

富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2013
Vol.86 No.

2

特集 創エネルギー技術 —発電プラントと新エネルギー—

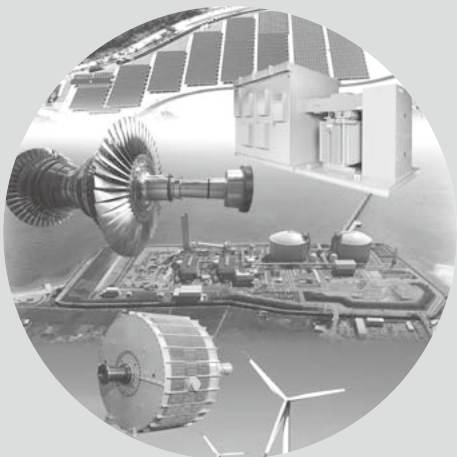


特集 創エネルギー技術 —発電プラントと新エネルギー—

CO₂の排出による地球温暖化の問題に加えて、東日本大震災後の原子力発電所の長期停止に伴う電力需給の逼迫により、環境負荷が少なく信頼性が高い発電プラントが要求されています。富士電機は、環境にやさしいクリーンエネルギーを創る“創エネルギー”技術として、発電プラントと新エネルギーの技術開発を進めています。発電プラントでは、“火力”“回転機”“水力”“原子力”の各分野で高効率化や高信頼性化の技術で地球環境保全と電力供給に貢献しています。新エネルギー（再生可能エネルギー）では、普及に向けて、地熱発電（バイナリー式、フラッシュ式）、風力発電、太陽光発電（メガソーラー）などの開発を進めています。本特集では、地球環境保全と安定した電力供給に寄与するこれらの創エネルギー技術を紹介します。

表紙写真

沖縄電力株式会社 安部メガソーラー（写真提供：沖縄電力株式会社）、メガソーラー用パワーコンディショナ「PVI1000シリーズ」、ニュージーランド・ナ アウ プルア地熱発電所向け 139 MW 蒸気タービンロータ、沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所（写真提供：沖縄電力株式会社）、風力発電用 3,000 kW 永久磁石同期発電機試作機



目次

特集 創エネルギー技術 — 発電プラントと新エネルギー —

〔特集に寄せて〕復興後の電力供給と電力産業の課題 内山 洋司	87 (3)
〔現状と展望〕創エネルギー技術の現状と展望 米山 直人	88 (4)
火力・地熱発電所のプラント技術 尾上 健志 ・ 山形 通史 ・ 上野 康夫	94 (10)
最新の地熱タービンにおける耐食性・性能向上技術 森田 耕平 ・ 佐藤 雅浩	98 (14)
地熱熱水利用バイナリー発電システムにおけるシリカスケール対策技術 川原 義隆 ・ 柴田 浩晃 ・ 久保田康幹	102 (18)
火力発電所向け蒸気タービンの最新技術 和泉 栄 ・ 森山 高志 ・ 池田 誠	107 (23)
一軸式コンバインドサイクル発電設備用全含浸絶縁水素間接冷却タービン 発電機 山崎 勝 ・ 新倉 仁之 ・ 谷藤 怜	113 (29)
大規模太陽光発電システム技術 中川 雅之 ・ 項 東輝	118 (34)
風力発電用のパワーコンディショナおよびコンバータにおける 回路・制御技術 梅沢 一喜 ・ 上原 深志 ・ 山田 歳也	124 (40)
風力発電用永久磁石同期発電機 真下 明秀 ・ 星 昌博 ・ 梅田 望緒	129 (45)
新規ニーズに対応した燃料電池 腰 一昭 ・ 黒田 健一 ・ 堀内 義実	134 (50)
水車・発電機の最新技術 塚本 直史 ・ 高橋 正宏 ・ 藤井 恒彰	139 (55)
水力発電プラントの機器更新技術 高橋 正宏	144 (60)
汚染土壌乾式除染・減容技術 神坐 圭介 ・ 富塚 千昭	148 (64)
新製品・新技術紹介	152 (68)
略語・商標	154 (70)

Contents

Energy Creation Technologies—Power Plants and New Energy

[Preface] Issues of Electricity Supply and Electric Industries after Reconstruction of the Earthquake Disaster	87 (3)
UCHIYAMA Yoji	
Energy Creation Technologies: Current Status and Future Outlook	88 (4)
YONEYAMA Naoto	
Power Plant Technologies for Thermal and Geothermal Power Plants	94 (10)
ONOE Kenji YAMAGATA Naofumi UENO Yasuo	
Recent Technology for Improving Corrosion-Resistance and Performance of Geothermal Turbines	98 (14)
MORITA Kohei SATO Masahiro	
Technology to Counter Silica Scaling in Binary Power-Generating System Using Geothermal Hot Water	102 (18)
KAWAHARA Yoshitaka SHIBATA Hiroaki KUBOTA Kokan	
Latest Steam Turbine Technologies for Thermal Power Plants	107 (23)
IZUMI Sakae MORIYAMA Takashi IKEDA Makoto	
Global VPI Insulated Indirectly Hydrogen-Cooled Turbine Generator for Single-Shaft Type Combined Cycle Power Generation Facilities	113 (29)
YAMAZAKI Masaru NIIKURA Hitoshi TANIFUJI Satoshi	
Technology for Large-Scale Photovoltaic Power Generation Systems	118 (34)
NAKAGAWA Masayuki XINAG Donghui	
The Circuit and Control Technology in the Power Conditioner and Converter for Wind Turbine Systems	124 (40)
UMEZAWA Kazuyoshi UEHARA Fukashi YAMADA Toshiya	
Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind-Power Generation	129 (45)
MASHIMO Akihide HOSHI Masahiro UMEDA Mio	
Development of Fuel Cells Adapted to Meet New Needs	134 (50)
KOSHI Kazuaki KURODA Kenichi HORIUCHI Yoshimi	
Latest Technology for Hydraulic Turbines and Generators	139 (55)
TSUKAMOTO Tadashi TAKAHASHI Masahiro FUJII Tsuneaki	
Equipment Replacement Technology at Hydroelectric Power Plants	144 (60)
TAKAHASHI Masahiro	
Technology for Dry Decontamination and Volume Reduction of Contaminated Dirt	148 (64)
JINZA Keisuke TOMIZUKA Chiaki	
New Products and New Technology	152 (68)
Abbreviations and Trademarks	154 (70)

特集に寄せて

復興後の電力供給と電力産業の課題

Issues of Electricity Supply and Electric Industries after Reconstruction of the Earthquake Disaster

内山 洋司 UCHIYAMA Yoji

筑波大学システム情報系教授
産学リエゾン共同研究センター長



エネルギーは、食糧や水と同じように、人々の生活や産業活動に欠かせないものであり、それは安価で安定して供給されなければならない。わが国のエネルギー供給に大切なことは、「エネルギー政策基本法」の基本方針に定められている。それは、“安定供給の確保”“環境への適合”“市場原理の活用”の三つの目標から成っている。

2011年3月に発生した福島第一原子力発電所の事故が国内外に与えた影響は甚大である。国民の多くが、原子力に対して批判的な立場になっているため、原子力発電の今後の方針は明確でない。民主党政権では、エネルギー基本計画を白紙にし、2030年に向けて原子力ゼロの政策を打ち出した。政権が自由民主党に移行してから、原子力発電を維持する方針が出されたが、どの程度の役割を担うかはまだ不透明である。

原子力事故の重大性はだれもが認識しているが、世論の一時的な感情の高まりに左右されて、基本方針が失われてはならない。安全で環境に良い社会を築くことは言うまでもない。しかし、それだけに固執することで、エネルギー安全保障の確立や安価なエネルギー供給という基本方針が無視されてはならない。

東日本大震災とその後に発生したタイの大洪水などによって日本経済は大きな痛手を受けた。そこに未曾有の円高が日本を襲い、日本経済は減速基調に陥っている。企業は生き残りをかけて、リスクがあっても市場が期待できる海外に進出しつつある。産業活動の海外移転に伴って、産業部門のエネルギー・電力需要は横ばいか低下傾向にある。また、政府による省エネルギー政策によって家庭や業務といった民生部門のエネルギー消費も鈍化しつつある。

国内のエネルギー供給としては、既存設備の寿命延伸、あるいは更新が最も経済的である。それには、現在、停止中の原子力発電所をできるだけ早期に再稼動する必要がある。しかし、再稼動の条件としてストレステストの検証と活断層の再評価が求められており、すべてが稼動するまでには長い時間がかかりそうである。その間、補完電源として再生可能エネルギーと火力発電に依存せざるを得ない。

国産エネルギーである太陽光、風力、バイオマス、地熱

など再生可能エネルギーが、原子力の代替電源として期待されている。しかし、地熱やバイオマスを除く再生可能エネルギーには、エネルギー密度の低さ、出力変動の大きさ、設備利用率の低さから発電コストが高くなるといった課題がある。導入を促進するために固定価格買取制度が施行されたが、企業活動や国民生活に影響がでない範囲の電気料金に抑えることが大切となる。また、導入に際してはできるだけ地域振興などを兼ねて地域社会の電源として普及していくことが望まれる。

原子力発電の代替として、石炭火力と液化天然ガス(LNG)火力の役割も大きい。地球温暖化問題がなければ、経済性に優れた石炭火力が望ましい電源である。石炭火力の導入は、温室効果ガスの排出量を大幅に削減することを国際社会に宣言してきたこれまでの日本の環境政策を考慮して判断することになる。二酸化炭素の発生を抑制するLNGコンバインドサイクル発電の導入も重要になる。しかし、輸入燃料であるLNGは石油と同じように、中東諸国の不安定な政情やイランによるホルムズ海峡の封鎖など、燃料の供給途絶という脅威にさらされる。

現時点では、どういった電源がどの程度まで導入できるか、将来の電源構成を明確にすることはできない。電気やガスなどのエネルギー産業は、これまでは国内需要が満たされ、また公益事業であったことから海外へ展開しなくても安定した事業経営をすることができた。しかし、国内のエネルギー需要は低迷し、今後も伸びが期待できない状況にある。

そういった中で、エネルギー産業をいかに活性化していけるかが課題となっている。政府は、発送電分離など電力産業の規制緩和によって活性化を図ろうとしている。しかし、ゼロサム社会の中で、石油会社、ガス会社、電力会社が互いに国内市場を奪い合って企業が疲弊するようになることだけは避けたい。競争は必要だが協調も大切だ。エネルギー産業にも自動車や家電製品と同じように海外市場に進出する戦略が求められる。メーカーとエネルギー業界が互いに協力し合うことで、電力市場が拡大している海外へ進出していく気概がほしい。

創エネルギー技術の現状と展望

Energy Creation Technologies: Current Status and Future Outlook

米山 直人 YONEYAMA Naoto

① まえがき

富士電機は、“創エネルギー”分野で火力発電設備や水力発電設備の高効率化や高性能化に取り組み、日本のみならず世界各国に数多く納入し、世界のエネルギーの安定供給に貢献してきている。また、地熱発電や水力発電など、再生可能エネルギーの中でも安定的にエネルギーを供給できる発電設備に取り組んできている。これらに加えて、太陽光発電や風力発電、小水力発電、バイオマス発電などの再生可能エネルギーにも注目し、技術開発と製品化を進めている。本稿では、エネルギーの安定供給と環境負荷低減に貢献する創エネルギー技術の現状と展望について述べる。

② 世界のエネルギー事情

2.1 世界のエネルギー動向

世界のエネルギー需要は、新興国の経済成長と人口の増加を背景に大きく伸びると予想されている。国際エネルギー機関（IEA）の2012年度レポート（World Energy Outlook 2012⁽¹⁾）では、特に電気エネルギーの伸びが大きく、世界の電気エネルギーの需要は2035年には36,637 TWhになり、年率2.2%の伸びを予測している（図1）。この中で、先進国は年率0.9%の伸びであるが、新興国では年率3.3%の伸びになると予測している。

エネルギーの種別で見ると、石炭火力や天然ガスを中心とした火力発電が大きな割合を占め、石油火力の比率は減少する。その一方で、環境負荷の低減も大きな課題であり、CO₂を排出しない環境にやさしい再生可能エネルギーが大きく伸び、特にバイオマス発電、風力発電、太陽光発電が大きく伸びる。再生可能エネルギーの比率は、水力発電を含めて約30%に増える。エネルギー需要の増加に対して、燃料費を含めた発電コストの経済性の追求とともに環境負荷の低減も大きな課題であり、火力発電では天然ガスやシェールガスを燃料としたコンバインドサイクル発電の導入や石炭火力の高効率化が進められる。

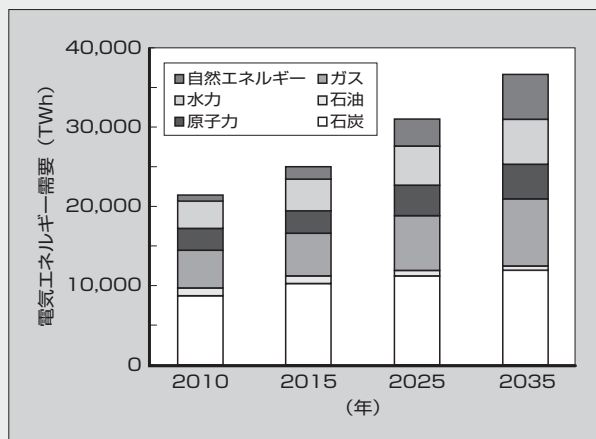


図1 世界の電気エネルギー需要

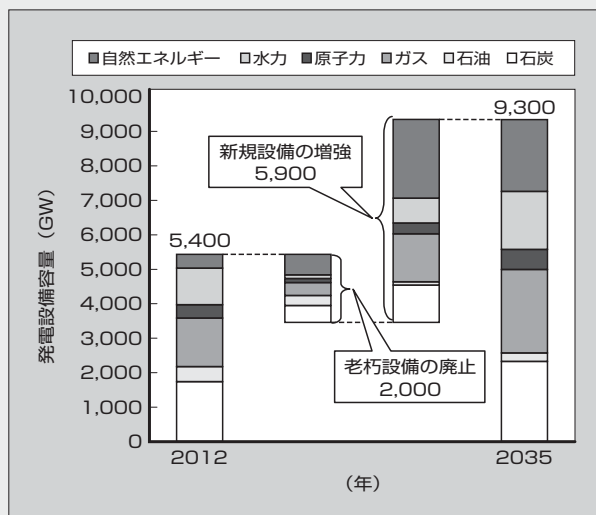


図2 世界の発電設備容量

電気エネルギー需要の伸びに対して、発電設備の発電容量の増強も必要である。図2に世界の発電設備容量を示す。2012年の世界の発電設備容量は5,400 GWであるが、2035年には9,300 GWの発電設備容量が必要であると予測されている。しかしながら、現在運転されている発電設備は、老朽化やCO₂排出低減、燃料費の高騰などにより、新鋭発電設備への置換えが必要となる。IEAレポートでは、2035年までに現在の発

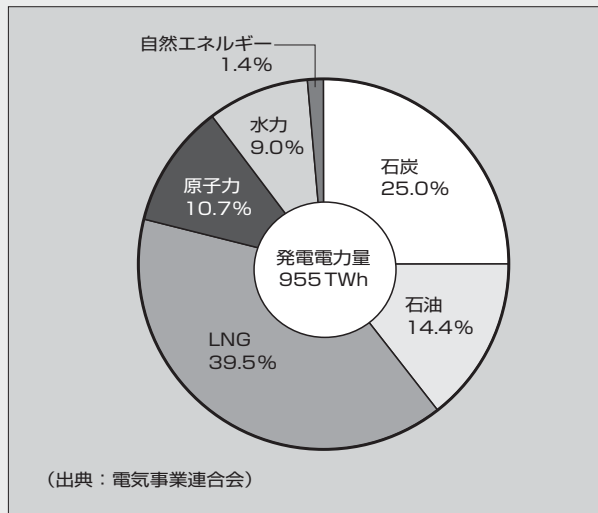


図3 日本の発電電力量の構成

電設備容量の約1/3に相当する2,000GWの発電設備が更新され、5,900GWの新しい発電設備が建設されると予想している。

2.2 日本のエネルギー動向

図3に日本の発電電力量の構成を示す。2011年3月の東日本大震災で福島第一原子力発電所が津波による災害を受けた影響で、原子力発電所の停止が続き、電力の安定供給に対する施策の展開が検討されている。原子力発電所の再稼働問題は国レベルで継続的に論議されている。2012年9月の「革新的エネルギー・環境戦略」では、エネルギーの安定供給の確保のために、火力発電の高度利用、コージェネレーションなど熱の高度利用、次世代エネルギー関連技術の開発と利用を推進するとの方向が示された。特に、電力の安定供給に対し、火力発電所の増強と再生可能エネルギーの導入促進が骨子になっている。火力発電所の増強では、天然ガスを燃料とする高効率なコンバインドサイクル発電の導入と、石炭を燃料とした超々臨界圧火力発電(USC)^(*)などが注目を浴びている。再生可能エネルギーでは、2030年までに300TWh(現在の3倍以上)の導入を目標に、2012年7月から始まった「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」と相まって再生可能エネルギーの導入に弾みがついている。

③ 火力発電

図1に示すように、現在、世界の電気エネルギー需要に占める火力発電の比率は約67%であるが、再生可

能エネルギーの導入促進などにより2035年には57%に低下する。一方、需要電力量でみれば約1.5倍に増加する。この中で、CO₂排出削減と燃料費を含めた経済性の点から石油火力発電は半減し、天然ガスを燃料とするコンバインドサイクル発電が1.8倍に増加し、石炭火力発電も新興国を中心に1.4倍近く増加する。

今後、火力発電分野では、天然ガスを燃料としたガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた高効率なコンバインドサイクル発電、ならびに石炭を燃料とし、蒸気条件を高温・高圧化して熱効率を高めた超々臨界圧火力発電(USC)が主流になる。

3.1 コンバインドサイクル発電

コンバインドサイクル発電は、高効率でCO₂排出量が少なく地球温暖化防止に貢献するとともに、起動時間が短く負荷変化への追従性能が良いなどの特徴を持っており、今後の火力発電で大きな位置を占める。また、これまでは天然ガスを燃料としていたが、最近、米国を中心にシェールガスの開発が急速に進んでおり、ガスタービンに対する期待が大きくなっている。

富士電機は、コンバインドサイクル発電にも取り組んできている。図4に示す沖縄電力株式会社吉の浦火力発電所向けに、コンバインドサイクル発電設備(2台、251MW)の建設を進めてきた。2012年11月には、1号機が総合試験を終了し、営業運転を開始した。2号機は2013年5月の営業運転開始を目指して総合試験を進めている。この発電設備は、シーメンス社との協業で、シーメンス社製のガスタービン(STG6-4000F, Fクラス)と富士電機が開発した単車室軸流排気再熱蒸気タービンおよび発電機を組み合わせた一軸式コンバインドサイクル発電設備である。プラントの

図4 沖縄電力株式会社吉の浦火力発電所
(写真提供：沖縄電力株式会社)

(*) 1) 超々臨界圧火力発電(USC)

使用する蒸気条件が超々臨界圧(蒸気温度593℃以上、蒸気圧力24.1MPa以上)の火力発電技術である。水

を気化させるための熱エネルギーを削減し、効率良く発電することができる。

性能試験では、効率で51%^(※2)以上を達成し、短時間での負荷応答機能や周波数調整機能などにおいて当初の計画を上回る良好な結果が確認された。

今後、コンバインドサイクル発電は、ガスタービンの燃焼温度の高温化による熱効率の向上と大型化が進む。シーメンス社も燃焼温度を高めた大容量Hクラスガスタービンを開発し、実際のコンバインドサイクル発電設備で効率60%^(※2)(LHV基準、送電端)を大幅に上回る世界最高効率を達成している。富士電機は蒸気タービンおよび発電機の高性能化と設備のコンパクト化を継続的に進め、国内外のコンバインドサイクル発電に取り組んでいく(113ページ“一軸式コンバインドサイクル発電設備用全含浸絶縁水素間冷却タービン発電機”参照)。

3.2 石炭火力発電

石炭火力発電は、経済性の面から新興国を中心に開発が進められている。先進国ではCO₂の排出低減への取組みから新規開発への制約が見られるが、超々臨界圧タービンの開発による高効率化や石炭ガス化などの新技術開発により、石炭火力の価値が見直されてきている。

富士電機は中容量領域で、多くの高性能・高信頼性の石炭火力発電設備を世界各国に納入してきている。最近では、ベトナムのハイフォン火力発電所向けに蒸気タービン・発電機(4台, 300MW)やギソン火力発電所向けの蒸気タービン・発電機(2台, 300MW)などに取り組んでいる。

超々臨界圧火力発電ではシーメンス社との協業で、電源開発株式会社 磯子火力発電所1号機のタービン・発電機(1台, 600MW)を納入している。主蒸気温度は600℃、再熱蒸気温度で610℃を採用し、先進の翼列設計により高いプラント効率を達成し、CO₂低減と経済性の向上に貢献している。今後も、蒸気タービンの主蒸気の高温・高圧化による効率の向上が求められる。一方で、タービンの信頼性の向上も重要な要素となる。そのために、蒸気タービン翼列の性能向上に加えて、ロータ材やケーシング材、タービン翼材の開発、ならびにタービン翼の耐食性能の向上、腐食モニタリング技術の開発などを継続的に進めている。

次世代蒸気タービンとして、さらなる効率の向上を狙いとした蒸気温度700℃クラスの先進超々臨界圧火

力発電(A-USC)の開発が進められている。富士電機も経済産業省の「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」に参画し、技術開発を進めている(107ページ“火力発電所向け蒸気タービンの最新技術”参照)。

4 地熱発電

地熱発電は、再生可能エネルギーの中でも、①天候などによる出力変動がなくベースロードとして利用できる、②設備利用率が高い、③経済性が高い、などの特徴があり、世界の地熱資源保有国で開発が進められている。

地熱資源は、環太平洋地域(日本、米国、インドネシア、フィリピン、ニュージーランド、チリ)やアフリカ地域(ケニア、エチオピア)などに多く存在し、各国で地熱発電の開発が進められている。日本も、米国、インドネシアに次ぐ第3位の地熱資源保有国(約23.5GW)といわれている。富士電機は、地熱発電に着目し、1960年代から地熱発電機器の研究開発に取り組み、信頼性の高い地熱発電機器を多数納入し、世界で高い納入シェアを持っている。

地熱発電には、次に示す二つの方式がある。地中から噴出する高温の熱水や蒸気を減圧沸騰させて蒸気だけを取り出し、地熱タービンに直接利用する大型のフラッシュ発電方式、ならびに比較的低い温度の地熱熱水で沸点の低い2次媒体を蒸発させ、この蒸気でタービンを回転させて発電する小容量のバイナリー発電方式である。

フラッシュ発電方式では、2010年10月に、ニュージーランドのナアワプルーア地熱発電所(図5)にトリプルフラッシュ^(※3)発電で世界最大容量である140MW地熱発電設備を納入した。最近では2012年12月に、インドネシアのウルブル地熱発電所向け地熱発電設備(2台, 55MW)を納入した(94ページ“火力・地熱発電所のプラント技術”参照)。

地熱発電では地熱流体に腐食性ガスや不純物が多く含まれており、腐食やエロージョン・コロージョン^(※4)、スケール付着などの問題が発生する。富士電機は、数多くの納入実績から得られた点検・保守データや、サイトでの実証試験データを基に研究を進め、タービン翼やケーシングの最適材料およびコーティング技術を

(※2) HHV, LHV

ある一定の状態に置かれた単位量の燃料が断熱的に完全燃焼し、その燃焼ガスを元の温度まで冷却したときに放散される熱量を“発熱量”という。発熱量には、水蒸気の潜熱を含める高位発熱量(HHV: Higher Heating Value)と、これを含めない低位発熱量(LHV: Lower Heating Value)がある。

(※3) トリプルフラッシュ発電

熱水として取り出された地熱資源を、減圧して蒸気と熱水に分離し、分離した蒸気をタービンに送って発電を行う方式をフラッシュ方式という。この蒸気と熱水の分離を3段階行うことをトリプルフラッシュ発電といい、取り出した地熱資源を最大限に利用することが可能となる。

(※4) エロージョン・コロージョン

エロージョン(流れや固体粒子による機械的な侵食)と、コロージョン(腐食性溶液中での電気化学的な腐食)の相乗作用により、金属の減肉が加速される現象をいう。



図5 ニュージーランド・ナアワプルーア地熱発電所

開発し、タービンや発電機、付属機器の信頼性向上を図っている。信頼性の向上とともに性能の向上も重要であり、腐食に強くかつ高効率なタービン翼などの開発も進めている（98 ページ“最新の地熱タービンにおける耐食性・性能向上技術”参照）。

バイナリー発電方式は比較的温度の低い地熱熱水を有効利用するために開発され、小型地熱発電として導入されることが期待されている。一方、フラッシュ発電方式において還元井に戻されていた還元熱水は、まだ熱エネルギーを持っているため、バイナリー発電方式に利用することも可能である。富士電機はこの発電方式をハイブリッド地熱発電と称し、発電所全体でのエネルギー回収効率の向上に寄与したいと考えている。温度の低い還元水はシリカスケールが生成しやすく、還元井の狭窄（きょうさく）を防止することが必要である。富士電機は還元熱水のシリカスケール生成の研究も進めており、その成果を生かしてハイブリッド地熱発電の普及を図っていく（102 ページ“地熱熱水利用バイナリー発電システムにおけるシリカスケール対策技術”参照）。

5 再生可能エネルギー

地球温暖化防止は社会的使命として重要な要素であり、CO₂を排出しない再生可能エネルギーの導入が世界各国で推進されている。IEA リポートでも、再生可能エネルギーの導入は年率6～8%で増加すると予想している。日本でも国のエネルギー政策の中で、エネルギーのベストミックスや分散型エネルギーシステ

ム、スマートコミュニティの構築などが論議され、その中で再生可能エネルギーの位置付けが大きくなっている。再生可能エネルギーの固定価格買取制度は、太陽光や風力、地熱、中小水力、バイオマス発電に適用され、発電電力を固定価格で決められた期間買い取ることを定めている。このため、再生可能エネルギーの発電事業者は事業計画を立てやすく、再生可能エネルギー発電の導入に弾みがついている。現状では建設が比較的容易な太陽光発電の導入が進んでいるが、これに続き、風力や地熱発電などの導入が進む。富士電機も再生可能エネルギー発電機器や設備の研究開発を進めており、高効率、高性能機器の製品化やEPC^(*)5)でのプラント建設に取り組んできている。

5.1 太陽光発電

太陽光発電には大きく分けて、住宅の屋根に設置する小型太陽光発電と、主に地上に設置する大規模太陽光発電（メガソーラー）がある。富士電機は、メガソーラーを中心に取り組んでいる。太陽光発電システムで重要なことは経済性をいかに高めるかである。単位面積当たりの発電量を多くすることをはじめ、発電システムの損失を小さくすること、機器の信頼性を高めて稼働率を高めることで年間の発電電力量を大きくすること、ならびに太陽光パネルの設置や配線などの施工工事コストを低減することが重要な要素となる。

富士電機は、今まで培ってきたパワーエレクトロニクス技術やシステム設計技術を活用し、経済性の高い太陽光発電システムを構築してきている。パワーエレクトロニクス技術分野では、業界に先駆けてAT-NPC（Advanced T-type Neutral-Point-Clamped）3レベル変換回路^(*)6)を適用した、DC1,000V、1MWのメガソーラー用パワーコンディショナ（PCS）を開発した（図6）。AT-NPC3レベル変換回路の適用によりスイッチング損失とフィルタ損失を大幅に低減し、世界最高効率98.5%を実現した。直流入力を1,000Vにすることにより直流側損失を低減でき、また屋外型を実現することでPCSを設置する建屋が不要になるなど建設コストの低減が期待できる。システム設計分野では、環境に合わせた太陽光モジュールやアレイの最適化、配電ロスの低減、系統連系要件に適合した連系設備の計画、監視制御のスマート化やクラウド化など、設置環境や経済性を考慮した総合システム設計技術の

(* 5) EPC

Engineering Procurement and Constructionの略である。プラント建設時の役割範囲として、エンジニアリング設計、資材・機材の調達、建設工事を指す。これらを一括して請け負うことを、EPC方式またはEPC事業という。

(* 6) AT-NPC3レベル変換回路

一般的な2レベル変換回路の出力電圧レベルが2段であることに対し、3レベル変換回路は1段多い。この結果、インバータの出力線間電圧波形がより正弦波に近くなり、装置のLCフィルタの小型化や高い電力変換効率などのメリットがある。従来の3レベル回路は、直流電源の中間電位点に結線されていることが

ら、NPC（Neutral-Point-Clamped）方式と呼ばれる。AT-NPC（Advanced T-type NPC）方式は、異なる定格電圧の素子を組み合わせ、中間素子にRB-IGBT（Reverse Blocking IGBT）を用いることで従来方式に比べて回路を簡素化し、高い電力変換効率を実現している。

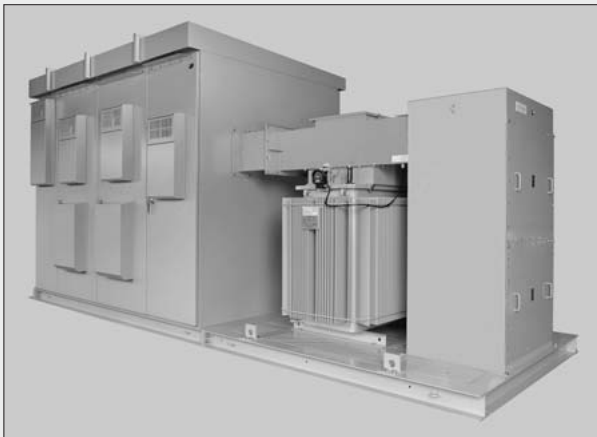


図6 屋外型 PCS (DC1,000 V, 1 MW)

向上を図っている（118 ページ “大規模太陽光発電システム技術” 参照）。

また、富士電機は山梨工場の遊休地に 2 MW の太陽光発電設備を建設する。ここでは、開発した PCS や系統連系設備の実証を行い、製品の信頼性確認と改良のためのデータ収集を行い、また、施工技術の改良のために活用することとしている。この発電設備は 2013 年 3 月末に竣工する予定であり、ここで得られる実証データや施工技術の有効性を活用し、性能や経済性の高い太陽光発電システムの構築を進めていく。

5.2 風力発電

風力発電も再生可能エネルギーの中で大きな位置付けになっている。日本では、これまで陸上設置型の風力発電が主流で規模も小さなものであった。今後は経済性の面から大規模風力発電（ウィンドファーム）が、設置場所の限界から洋上風力発電が注目され、単機の発電容量も 3 ～ 5 MW クラスの大型風力発電設備になっていく。富士電機は、風力発電設備用の大型発電機や PCS、電力安定化装置などに注力している。

風力発電では、風車の回転数を増速機で増速し、発電機を高速で回転させるダブルフェド方式が一般的であった。しかしながら、洋上風力など発電容量が大きくなると大型の増速機が必要になり、また増速機に起因するトラブルやメンテナンスの課題が大きくなる。最近の動向として、大型風力発電は増速機を省略したダイレクトドライブ方式が適用されるようになっていく。

富士電機は、ダイレクトドライブ方式に適用する 3,000 kW の永久磁石同期発電機の開発を行い、製品

化した。ダイレクトドライブ方式では回転速度が 15 min^{-1} 前後の低速となり発電機が大型となるが、永久磁石による励磁方式を採用し、通風・冷却方式や巻線方式、構造を最適化し、小型・軽量化と高性能化を図った。また、この方式では発電機に対してフル容量の大型 PCS が必要となるが、富士電機の持つパワーエレクトロニクス技術を生かした AT-NPC 3 レベル変換回路を PCS に適用し、高効率化を図っている（129 ページ “風力発電用永久磁石同期発電機” 参照）。

冷却には洋上風力への適用を考慮して外気による空冷方式ではなく水冷方式を採用し、さらに FRT 機能を標準装備させるなどの特徴を持たせている。

また、風力発電は出力が時々刻々と変化するため、電力品質への影響が課題である。富士電機では、蓄電池と電力安定化装置を組み合わせ、蓄電池の充放電制御により風力発電の出力変動を抑制し、電力系統の電圧・周波数の品質を高める電力安定化装置も実用化するなど風力発電の導入促進に寄与している（124 ページ “風力発電用のパワーコンディショナおよびコンバータにおける回路・制御技術” 参照）。

5.3 水力発電

水力発電は、太陽光発電や風力発電に比べて出力変動がなく、利用率も高く安定した再生可能エネルギーである。日本においては、大型の水力発電は既に開発され、今後の開発地点は限られている。しかしながら、中小水力発電では、農業用水路や上下水道などの遊休落差を利用した発電が可能である。再生可能エネルギーの固定価格買取制度でも、30 MW 未満の中小水力発電は固定価格買取の対象設備であり、制度を利



図7 マイクロ水力発電設備

(* 7) FRT 機能

FRT (Fault Ride Through) 機能は、系統での三相短絡や二相短絡の事故において、インバータが出力をすぐに停止することなく、規定範囲内で三相電流を出

力して系統の電源変動を抑制させるように動作し、運転を継続するものである。この規定範囲は、瞬低の時間と電圧低下範囲として、各国で定められている。

用した開発が期待されている。

富士電機は、容易に小水力発電設備を設置できるように、横軸チューブラ水車^(※8)と発電機をコンパクトに組み合わせて標準化し、マイクロ水力発電設備を開発した(図7)。出力は落差、流量に応じて数kW～200kWの範囲で、農業用水路や上下水道、砂防ダムなどに適用可能である。マイクロ水力発電設備は、直列に配置することにより高落差にも適用できる。また、ランナベーンを可動にすることにより流量制御が可能であり、広範囲な領域において高効率化できるなどの特徴を持っている。今後も、小水力発電設備の研究開発と特徴ある製品化を進め、遊休エネルギーの有効利用に貢献していく。

6 あとがき

今後も世界の電力エネルギーの需要は大きく増加し、これに伴って電力エネルギーを創る“創エネルギー”も重要な役割を持つ。富士電機は、電力の安定供給と低炭素社会の実現のために、創エネルギーへの取組みを継続的に進めていく。大型火力発電や地熱発電、水力発電の研究開発を今後も進め、高効率、高性能で信頼性の高い発電設備を提供していく。再生可能エネル

ギーは、CO₂を排出しない環境にやさしいエネルギーであるとともに、エネルギーのベストミックスの中で重要な位置付けになる。再生可能エネルギー分野では発電機能だけではなく、系統連系技術や安定度向上技術も重要になる。富士電機が得意とするパワーエレクトロニクス技術や制御技術を融合し、最適なシステムを構築していきたい。

富士電機は、これから発展が期待されるスマートコミュニティの構築にも取り組んでいる。スマートコミュニティ社会の構築には、創エネルギー、省エネルギー、パワーエレクトロニクスとエネルギー最適制御、情報通信などの集結が重要であり、富士電機の総合力を持って社会に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) International Energy Agency, World Energy Outlook 2012.



米山 直人

富士電機株式会社執行役員常務、発電・社会インフラ事業本部長。電気学会会員。

(※8) チューブラ水車

円筒ケーシング内に流水で回転する水車ランナを収納し、軸方向から流入した流水が軸方向に流出する水車で、低落差の水力資源を有効に利用することができる。

火力・地熱発電所のプラント技術

Power Plant Technologies for Thermal and Geothermal Power Plants

尾上 健志 ONOE Kenji

山形 通史 YAMAGATA Naofumi

上野 康夫 UENO Yasuo

火力・地熱発電所の建設では、多くの要素技術が関わりを持っている。近年、建設を終えたプラントで、その主要な技術を説明する。吉の浦火力発電所は、沖縄電力株式会社が燃料に初めてLNGを採用した一軸式コンバインドサイクル火力発電所で、沖縄本島の最大容量機を持つ。ガスタービンと蒸気タービンにガバナフリー制御を導入して、応答性能を向上させた。ウルブル地熱発電所は、インドネシア政府の第二次電源開発計画の下に開発された最初の地熱発電所であり、モデルプラントとして注目された。ガス抽出設備のハイブリッド化や主要機器の配置の全体最適化などを行った。

In construction of thermal and geothermal power plants, many kinds of elemental technologies are concerned. This paper describes about main technologies in plants completed in recent years. Yoshinoura thermal power plant is Okinawa Electric Power Company's (OEP) first LNG-fueled single-shaft combined-cycle thermal power plant, and has the largest capacity generator in Okinawa Island. Governor-free control system is adopted both for gas turbine and steam turbine to enhance response to variation of frequency. The Ulubelu geothermal power plant is the first geothermal power plant developed under the Second phase of Indonesian government's electricity crash program, and has received attention as a model case. Hybrid gas-extractor facilities and overall optimization in arrangement of major equipment have been achieved.

1 まえがき

沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所（1号機）とウルブル地熱発電所が、2012年度に運転を開始した。いずれも富士電機の納入する発電設備がその地域の電力系統における主力設備となるため、顧客をはじめとするステークホルダーから着目される中で遂行されたプロジェクトである。

吉の浦火力発電所の1号機は、富士電機にとって一括請負工事（EPC）としてまとめたガスタービンコンバインドサイクル（GTCC）の最大容量機であるとともに、沖縄本島における最大容量機でもある。ウルブル地熱発電所は、電力系統の脆弱（ぜいじゃく）なインドネシア・スマトラ島の、しかも高地に建設された地熱発電所であり、同島の中でも大規模容量の発電所である。

これらの発電所を例にして、火力・地熱大型プロジェクトにおけるプラント技術について述べる。

2 沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所

2.1 プラント概要

富士電機とシーメンス社は、沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所に一軸式コンバインドサイクル発電設備を納入した。図1に吉の浦火力発電所の全景を示す。本発電所は、地球温暖化対策として石炭火力に比べて高効率で、CO₂排出量が約半分となる液化天然ガス（LNG）コンバインドサイクル火力発電所である。1号機、2号機の発電出力はともに251 MWで、沖縄本島の最大容量機となり県内の約20%を賄う設備となる。

ガスタービンはシーメンス社製の1,400℃級のSGT6-4000F形（Fクラス）を使用し、ガスタービン-発電機-クラッチ-蒸気タービンで構成した一軸式コンバインドサ



図1 吉の浦火力発電所の全景

イクル発電方式を採用した。発電機には起動用電動機に静止型周波数変換装置を採用し、起動時はクラッチで蒸気タービンを切り離して起動損失の低減を図っている。1号機は2012年11月に営業運転を開始し、2号機は2013年5月に営業運転を開始する予定である。

2.2 配置設計および建設に関わるプラント技術

発電設備は、2011年3月から1号機排熱回収ボイラの据付けを、5月から1号機ガスタービン・発電機・蒸気タービンの据付けを開始した。これらの大型機器は、発電所内に新設された物揚げ栈橋から荷揚げし、低床トレーラーで構内に搬入し、パワージャッキ方式でタービン建屋内の基礎の上に据付けを行った。

従来、1号機ガスタービン・発電機・蒸気タービンからなる主機はタービン建屋の3階に配置されるため建屋の高さは25m以上が必要であったが、本発電所では主機の軸芯をFL（1階床高さ）+5.5mにすることでタービン建屋の高さを約20mと従来よりも低くすることができ、経済性を考慮した建屋計画としている。建屋内は、機器・配

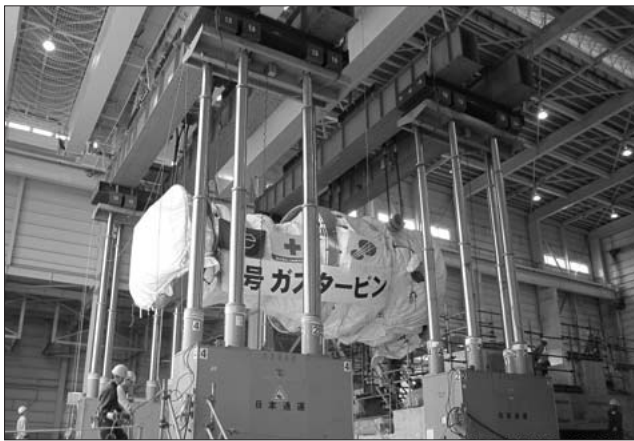


図2 ガスタービンの基礎上への据付け



図3 負荷遮断試験時の中央操作室

管・電気設備が上下左右にコンパクトに配置されているため、各種の据付け作業が混み合うことが予想されたが、工程・作業調整を行い、無事故無災害で1号機の据付け工事を完了した。図2に、ガスタービンの基礎上への据付けを示す。

機器の搬送においては、沖縄地域特有の気象条件である台風の度重なる襲来を想定した。船舶の欠航を考慮し、強風による屋外作業の中止や被害の復旧などによる工程の遅れが生じないように、日々台風の発生状況や予想進路を見据え、作業工程の入替えや負荷残処理などを実施した。これにより、据付け工程への影響を最小限に抑え、2012年5月の試験開始につなげることができた。

2.3 制御技術およびプラント技術

2012年5月に、1号機の試運転における最初のイベントとして、ガスタービンの初点火を実施した。これに続き、ガスタービン無負荷運転・燃焼調整を行うとともに、排熱回収ボイラの温水洗浄ならびに蒸気配管のブローイングアウト運転を行った。2012年6月には6MWで系統への初併入^(注1)を行い、プラントの総合試運転を開始した。6か月間にわたる総合負荷運転では、負荷遮断試験までは各機器の静特性確認を、負荷遮断試験以降は各機器の動特性確認を沖縄電力株式会社の協力の下、着実に進めた。

沖縄本島の電力系統は、他の電力会社の電力系統から独立している。発電容量が電力系統の20%に相当する本発電設備を系統につないだ状態で、試験中に不具合が生じると、沖縄本島の電力に大きな影響を及ぼす可能性が危惧された。そのため、特に100%負荷遮断試験は緊迫した状況での実施となった(図3)。

沖縄電力株式会社では、試験実施時の電力供給量の変動が電力系統に与える影響を抑制するため、すなわち電力系統における需給バランスを維持するために、電力系統に接続されている他の発電所と連携した供給体制が綿密に計画された。設備側では負荷遮断後、蒸気タービンをクラッチ〔タービンと発電機の上に位置し、切り離しが可能な嵌合(かんごう)設備〕で離脱・停止し、ガスタービン無負荷単独運転に移行する確認が行われた。

本発電設備の容量が電力系統の容量の20%に相当することから、電力系統の周波数を維持するための本発電設備の役割は大きい。短時間で推移する電力需要に速やかに対応できる負荷変化機能と、周波数応答機能を発電設備に持たせることが重要になる。本発電設備には、最小負荷から最大負荷までの範囲の通常運用に対して、EDC(経済負荷配分制御)、AFC(自動周波数制御)およびGF(ガバナフリー^(注2))制御を組み合わせることが可能な運用機能を持たせた。特徴的な機能として、一軸でつながるガスタービンのガバナフリー制御を持たせるだけでなく、高圧蒸気ドラムの蓄熱を有効に利用するために蒸気タービンにもガバナフリー制御を持たせた。これにより、燃料制御系に起因するガスタービン出力制御のわずかな遅れを蒸気タービンでカバーし、応答性試験では応答性能および負荷応答幅を調整することで要求を満足する結果が得られた。

10月に実施したプラント性能試験では、国内に導入された1,400℃級ガスタービン(Fクラス)の最高効率レベルである51%(HHV基準)以上の出力が可能であることを確認した。通常運用の負荷範囲において低NO_x排出濃度を実現するために採用した2段式燃焼器と脱硝装置の組合せにより、NO_x排出濃度5ppm(16%酸素換算)を十分下回ることを確認した。

2012年11月26日から27日にかけて使用前自主検査の最後の試験となるヒートラン試験を行い、11月27日に無事営業運転が開始された。

2.4 今後の展開

本プロジェクトでは、国内大型事業用コンバインドサイクル発電設備に初めてシーメンス社製ガスタービンを採用した。世界の100MW以上のガスタービンの納入実績において、シーメンス社製ガスタービンは台数ベースでシェア40%以上を維持している。豊富な納入実績を持つFクラスガスタービンに加えて、Hクラスガスタービン

〈注1〉 併入：発電機を送電系統に連系して電力の送電を開始すること

〈注2〉 GF(ガバナフリー)制御：系統周波数変動に呼応して負荷を変動させる機能

(SGTx-8000H) の受注が活発になっている。

富士電機は、吉の浦火力発電所の納入実績を基にして、国内にコンバインドサイクル火力発電所を納入することに注力していく。

3 ウルブル地熱発電所

3.1 ウルブル地熱発電所プロジェクトの概要

本プロジェクトは住友商事株式会社（以下、住友商事）が主契約者として、2×55 MW の地熱発電設備（Portion-A）、変電設備（Portion-B）、送電線（Portion-C）のEPC契約で2010年2月にインドネシアの国有電力会社であるPT. PLN（以下、PERSERO）から受注した。富士電機と現地のエンジニアリング会社であるPT. ReKayasa Industri（以下、レカヤサ社）が住友商事から請け負った。富士電機の主要役務は、テクニカルリーダー、蒸気タービンをはじめとする主要設備の設計、製作、調達および試運転であった。レカヤサ社は、BOP（プラント付帯設備）の設計・調達および土建・据付け工事を担当した。

インドネシア政府は、国内の電力不足を解消するために第2次電源開発計画を推進している。2010～2014年で約9,500 MW の電源開発を行い、そのうちの約4,000 MW が地熱発電である。本発電所はこの計画における最初の地熱発電所であることから、モデルプラントとして注目された。

現地は、スマトラ島南部の地方都市バンダルランブーンから西に約100 km、標高780 m の山中に位置し、車で約3時間の所要時間である（図4）。

プロジェクトの契約から引渡しまでの期間は、1号機が28か月、2号機が32か月である。

ウルブル地熱発電所は、地熱発電では一般的なシングルフラッシュ発電を適用している。主体が液体である熱水卓越型の地熱資源は、生産基地に設置された汽水分離器によって蒸気と熱水に分離される。蒸気は発電所へ送られ、熱水は還元井に戻される。蒸気は、発電所との取合い点の近傍に設けられたベント設備で一定圧に制御され、発電所側に設けられたデミスターによって最終の湿分除去が行われ、蒸気タービンに導かれ発電を行う。発電所の主系統を図5に示す。

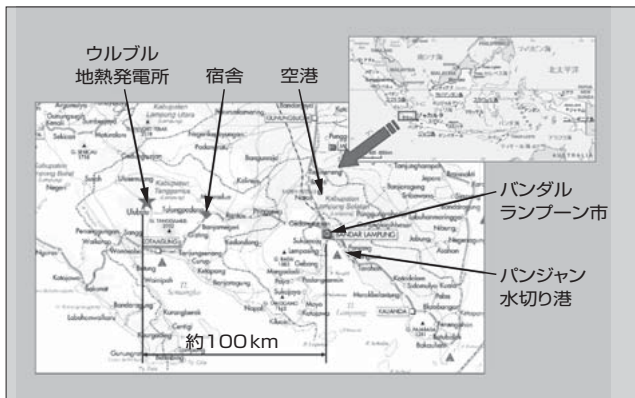


図4 ウルブル地熱発電所の建設地点

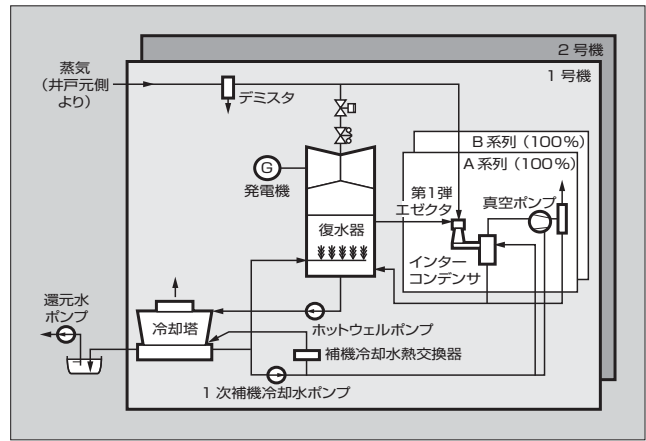


図5 ウルブル地熱発電所の主系統

発電設備の主要機器である蒸気タービンや発電機、復水器は富士電機製である。冷却塔をはじめ、不凝縮ガス抽出設備、ホットウェルポンプ、配管、バルブなどは日本国内および第3国から調達し、電気設備、FRP管、ケーブル類などをインドネシア国内から調達した。

発電所外の地熱資源供給・還元設備については、別途PT. Pertamina Geothermal Energy（以下、PGE）が担い、PERSERO との間で蒸気売買契約を結んでおり、蒸気および還元水は発電所の敷地の近傍で取り合っている。

3.2 設計・建設時のプラント技術

蒸気タービンは、富士電機の地熱向け蒸気タービン「GKシリーズ」を適用した（図6）。単気筒、複流、反動型、復水式である。最終段低圧翼のサイズは地熱発電向けで実績のある21.8インチ翼を採用した。タービン入口における蒸気条件は0.76 MPa/168℃で定格出力55 MW（最大出力57.75 MW）である。

発電機は、定格容量68.75 MVAであり、地熱（腐食）雰囲気における使用となるので、硫化水素ガス除去フィルタの設置など実績のある地熱対策を施した2極全閉空気冷却式を適用している。

復水・冷却設備は、復水器、ホットウェルポンプ、冷却

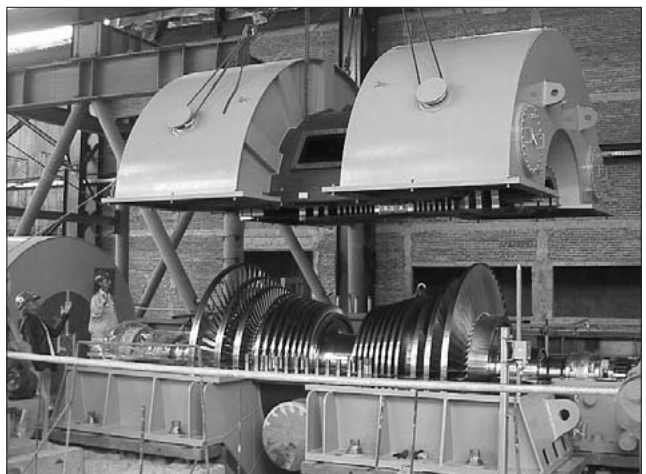


図6 据付け中の蒸気タービン

塔および循環水配管で構成される。総合的なシステムとして設備容量の最適点を検討し、設計定格真空 0.01 MPa を最適点として各設備の設計を行った。復水器は、地熱発電向けに実績があり、効率の良い直接接触式を採用している。

地熱発電の特徴である多量の不凝縮ガスを抽出するガス抽出設備は、蒸気エゼクタと真空ポンプのハイブリッド式を適用し、エゼクタと真空ポンプ容量の最適な組合せ設計を行うことで、効率の良い設備構成としている。

上述の主要機器を中心に、配置の全体最適化を行った。同時に、主蒸気配管や循環水配管などの大口径配管のサイズとルート最適化を行った。これにより、配管圧力損失の減少によるプラント効率の改善に加え、配管の物量を減らすことができた。

また、1号機と2号機の工事が一時期、並行して行われるプロジェクトであることを考慮し、共通部分や互いに干渉する部分などの工事手順をレカヤサ社とあらかじめ協議し、必要な機器や材料がタイムリーに現地に納入できるように分割納入も考慮した納期設定を行った。特に重要なアイテムについては、進捗確認などの納期管理を確実にを行った。

工事期間中は、乾季（4～9月）においても雨が比較的多く、雨が降ると重機が動けなくなるような土地であったため、工事進捗は少なからず天候の影響を受けた。これに加え、工事がスマトラ島の山中であったため、作業者の確保・増員が難しく、限られたマンパワーでの工事となった。富士電機からもアドバイザーを現地に派遣し、効率的な作業工程の提案や工程管理に努めた。

今後、建設される地熱発電所は、さらにアクセスの悪いところが多くなることが予想される。単にアクセスの面だけでなく、マンパワーの確保についてもあらかじめ十分な検討が必要と考える。

3.3 試験時のプラント技術

南スマトラ地域では、富士電機が蒸気タービン発電機設備を納入したタラハン火力発電所（2×100 MW）が最大であり、電力系統が脆弱であるため、受電以降も発電所外の電力系統のトラブルによって試運転に影響を受けることが多かった。

1号機の初併入以降は、系統トラブル時には発電所を系統から切り離して安定した運転を継続した。その際に、PGE が運用を行う地熱資源供給設備とも、所内単独運転へ移行させる信号など、必要な信号授受を行うことで連携を取り、急激な負荷変化などにも協調して追従する運用ができることを確認した。2012年10月、契約納期の1週間前にプラントを引き渡した。ウルブル地熱発電所の営業運



図7 ウルブル地熱発電所の全景

転によって、南スマトラの安定電力供給に大きく貢献することができた（図7）。

4 あとがき

火力・地熱発電所のプラント技術について述べた。ガスタービンコンバインドサイクル発電および地熱発電は、CO₂排出量が少なく、環境にやさしい発電方式であり、今後も世界各国で技術改良、改善活動が実施されていく。

ガスタービンコンバインドサイクル発電では、世界の最新技術を国内マーケットに導入する役割を担っていき、地熱発電では、最新・最適化技術を世界に展開していく所存である。



尾上 健志

火力・地熱発電プラントの技術取りまとめに従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部火力・地熱プラント総合技術部課長。



山形 通史

コンバインドサイクル発電設備のプラントエンジニアリングプラント業務に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部火力・地熱プラント総合技術部主任。日本ガスタービン学会会員。



上野 康夫

火力・地熱発電プラントの技術取りまとめに従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部火力・地熱プラント総合技術部長。

最新の地熱タービンにおける耐食性・性能向上技術

Recent Technology for Improving Corrosion-Resistance and Performance of Geothermal Turbines

森田 耕平 MORITA Kohei

佐藤 雅浩 SATO Masahiro

地熱エネルギーは、CO₂をほとんど排出しないクリーンなエネルギーであり、富士電機は、国内外に約60台の地熱タービンを納入している。地熱タービンにおける耐食性向上技術では、翼脚や翼溝へのショットピーニング、2%Cr鋼のロータや浴射によるコーティング技術を開発した。性能向上技術では、地熱用新世代低圧翼や高負荷高効率反動翼を開発するとともに、最適化設計により高性能コンパクト型の排気ケーシングを実現した。さらに、トリプルフラッシュ発電の採用により、地熱単機容量では世界最大出力となる地熱タービンを実現した。

Geothermal energy is a clean form of energy that produces almost no CO₂ emissions. Fuji Electric has supplied approximately 60 geothermal turbines to power plants in Japan and other countries. We have developed several technologies for improving corrosion-resistance of geothermal turbines, including shot-peening of turbine blade legs and grooves, rotors made from 2% chromium steel and spray-coating technology. In the area of performance-enhancing technology, together with new-generation, low-pressure turbine blades for geothermal energy production and high-load, high-efficiency reaction turbines development, we have also achieved the creation of a high-performance, compact exhaust casing through optimized design. Furthermore, through use of triple-flash power generation, we have achieved the creation of a geothermal turbine with the greatest output for single-unit capacity in the world.

1 まえがき

地熱発電は、地熱により熱せられた蒸気と熱水の混合流体（地熱流体）を地中に深く掘った井戸（地熱井）から噴出させ、その熱エネルギーを利用して発電する。地球が持つ熱エネルギーは人類にとってはほとんど無尽蔵といってもいいほど膨大なものであるが、利用できるのは地表近くの地殻にあるごく一部のものに限られており、これを特に地熱エネルギーと呼んでいる。地熱エネルギーは、化石燃料を燃焼させて発電する火力発電と異なり、地球温暖化の原因となるCO₂をほとんど排出しないクリーンエネルギーである。再生可能エネルギーの中でも風力や太陽光などと比べてエネルギー密度が高く、また天候などに左右されない安定した発電ができることが特徴である。

富士電機は、1960年にわが国で初めての实用地熱発電設備を藤田観光株式会社 箱根小涌園に納入して以来、国内外に約60台の地熱タービンを納入しており、世界的なトップメーカーの一つに挙げられている。本稿では、富士電機の最新の地熱タービンに採用している耐食性・性能向上技術について述べる。

2 耐食性向上技術^{(1),(2)}

2.1 耐食性評価技術

地熱流体中には腐食性のある不純物が多量に含まれている。したがって、地熱タービンの設計においては、材料の耐食性と使用可能な応力レベルを評価することが不可欠である。そこで、実験室の模擬地熱環境で材料試験を行うと同時に、世界各地の地熱サイトに試験装置を設置して地熱蒸気および復水中での材料試験を行い、耐食性に関わるデータを蓄積した。



図1 ロータ翼溝へのショットピーニング

2.2 応力腐食割れおよび腐食疲労への対策

地熱タービンを設計する上で特に問題になるのは、運転中に高い遠心力や蒸気の圧力を受ける動翼の翼脚やロータの翼溝である。翼脚や翼溝の応力集中部に対してショットピーニングを実施して耐食性を高める技術を開発し、実機に適用した（図1）。模擬地熱環境で比較試験を行った結果、ショットピーニングにより部材の応力腐食割れ（SCC：Stress Corrosion Cracking）および腐食疲労（CF：Corrosion Fatigue）強度が大幅に向上することを確認した。図2にSCC試験結果を示す。

2.3 エロージョン・コロージョン対策

近年、地熱井の探査技術や掘削技術などが発達したことによって、比較的深部にある地熱資源が開発されている。これに伴って、地熱タービン入口の蒸気圧力が従来の

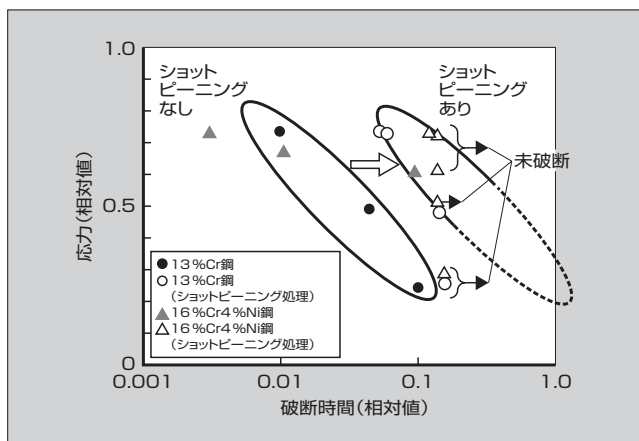


図2 ショットピーニングによる耐力向上
(応力腐食割れ試験結果)



図3 高速フレイム溶射によるコーティング

1 MPa 前後から 2 MPa 前後へと上昇する傾向がある。湿り蒸気タービンの場合^(注)、入口蒸気圧力が上昇するとエロージョン・コロージョンが発生しやすくなる。エロージョン・コロージョンとは、蒸気流の機械的作用と化学的作用の相乗効果により部材表面が減肉する現象であり、炭素鋼や低合金鋼を使用している静翼ホルダやロータの表面に生じやすい。エロージョン・コロージョン対策として、従来のロータ材料である 1%Cr 鋼よりエロージョン・コロージョン耐性が高い 2%Cr 鋼を使用したロータを開発した。また、ロータの表面に WC-CoCr 系の材料を高速フレイム (HVOF: High Velocity Oxy-Fuel) 溶射によりコーティングする技術を開発した (図 3)。

2.4 エロージョン対策

水滴の衝突 (ドレンアタック) によるエロージョンは、火力タービンの場合と同じ現象である。蒸気よりも熱水が多い地熱発電プラントは全段が湿り蒸気中で運転されるため、ドレンアタック・エロージョンに対する設計的な配慮

〈注〉湿り蒸気タービン：主蒸気が、飽和または飽和に近い蒸気であるタービンをいい、飽和蒸気タービンともいう。

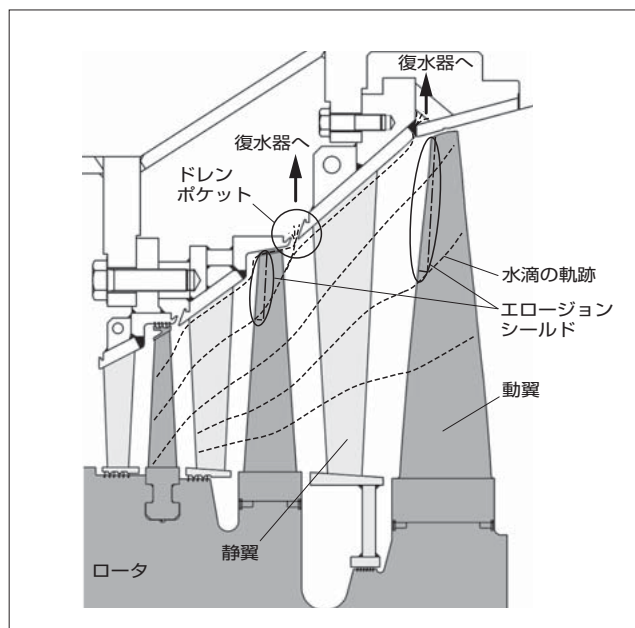


図4 ドレン除去構造

が必要である。ドレンポケットを設けてエロージョンの原因となる水滴を除去するとともに、動翼前縁部にエロージョンシールドをろう付けして保護する対策を行っている (図 4)。

2.5 スケール対策

地熱蒸気に含まれるシリカや炭酸カルシウムなどは、翼やケーシング、ロータなどの部材の表面に析出・堆積してスケールとなる。翼表面に堆積したスケールは、蒸気の通路を狭めて出力低下の原因となる。また、回転部と静止部の隙間に堆積したスケールは、部材の摩耗の原因となる。スケール対策として、蒸気タービンの入口に水滴を噴霧するブレード・ウォッシング技術を開発した。

③ 地熱タービンの性能向上技術⁽¹⁾

3.1 地熱用新世代低圧翼

低圧翼 (最終 2~3 段) は翼長が長く、また湿り蒸気中で用いられるため、過大な応力やエロージョンに耐える必要があり、開発に多大な時間と労力を必要とする。このため、低圧翼シリーズとしてラインアップし、プラントに最適な低圧翼を選定している。

地熱用新世代低圧翼は、地熱タービンの豊富な運転実績に基づいており、信頼性が高い。地熱タービンは腐食のある雰囲気中で用いられるため、応力腐食割れや腐食疲労などに対する特別な配慮が必要である。このため、新シリーズの開発では、確立された従来開発手法をベースに、三次元粘性流れ解析や FEM 解析によってプロファイル形状の高度な最適化を行うことで信頼性を確保しつつ、従来型よりも大幅な高効率化を実現した。

地熱用低圧翼列部の流れ解析例 (マッハ数分布) を図 5 に示す。翼後縁を起点とする斜め衝撃波と隣接翼背側境界

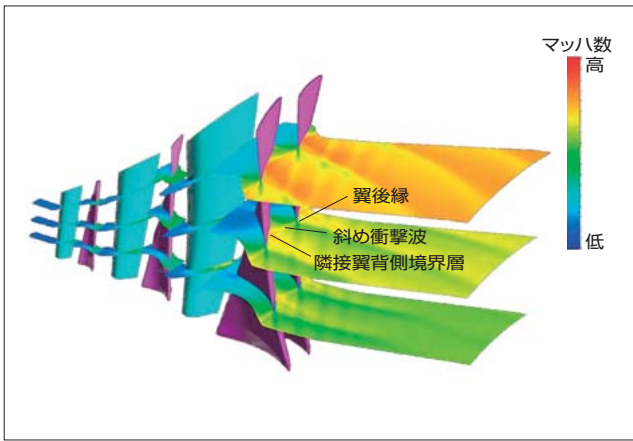


図5 地熱用低圧翼列部の流動解析例（マッハ数分布）

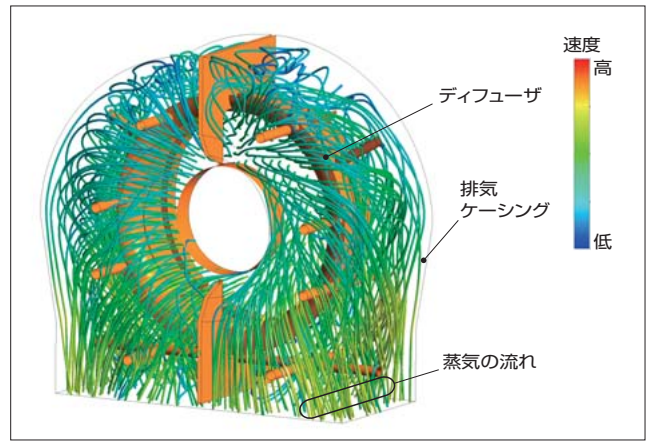


図7 地熱用排気ケーシングの三次元粘性流れ解析結果

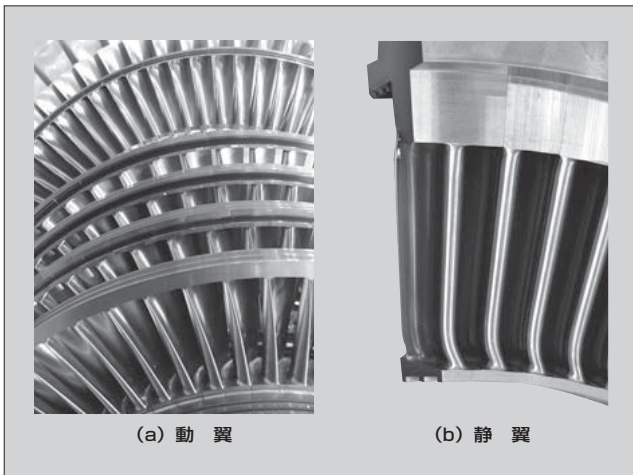


図6 高負荷高効率反动翼

層との干渉による、干渉域後流での境界層の発達が最小限に抑えられている。

3.2 高負荷高効率反动翼

低圧翼以外の翼列には、最新のねじれ翼列の設計技術を用いて、段落当たりの負荷を増大させながら高い効率を維持させた高負荷高効率反动翼を適用することで、翼列効率を1～2%向上させた。高負荷高効率反动翼は1本のパー材から翼とシュラウドを一体に削り出したインテグラルシュラウド翼としており、腐食性の高い地熱蒸気に対し、高い信頼性を実現している（図6）。

3.3 高性能コンパクト型排気ケーシング

排気ケーシングは、低圧翼から排出された蒸気を減速し、復水器へ導く流路になる。低圧翼から排出された蒸気は、ロータの回転エネルギーに変換できず、もはや発電には寄与しない。さらに、排気ケーシングでの全圧損失はタービン翼列の有効熱落差を減らすため、結果としてタービンの性能を低下させる。

一般に、排気ケーシングをコンパクト化すると、流路断面積の減少によって蒸気流速が増加するため、性能上不利となる。そこで、三次元粘性流れ解析によるディフューザ

および排気ケーシングの形状の最適化を行った。これにより、従来よりも減速効果の高いディフューザ形状が可能となり、翼列の有効熱落差を増加してディフューザ流出後の全圧損失を低減することで、排気ケーシングの高性能化とコンパクト化を達成した（図7）。

4 最新の地熱タービンの特徴

2008年に運転を開始したニュージーランド・ナアワプ



図8 ナアワプ地熱発電所の全景

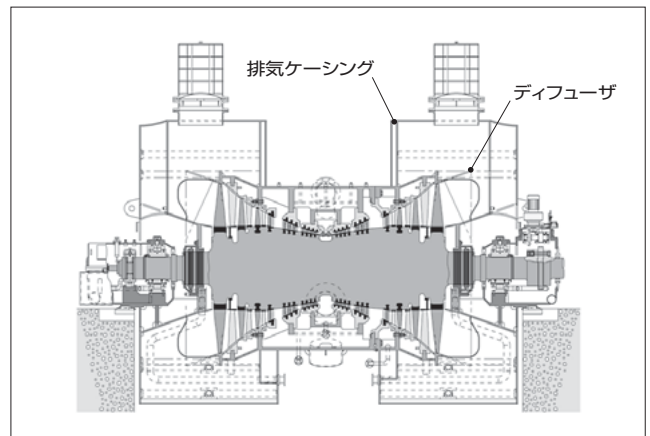


図9 NAP地熱発電所向け地熱タービンの断面図

ルア (Nga Awa Purua : NAP) 地熱発電所 (図 8) 向け地熱タービンは、最終段には地熱発電用としては世界最大クラスの 798 mm 翼を採用している。図 9 に NAP 地熱発電所向け地熱タービン断面図を、図 10 に据付け中の地熱タービンロータを、図 11 に NAP 地熱発電所向け地熱タービンの外観を示す。



図 10 据付け中の地熱タービンロータ



図 11 NAP 地熱発電所向け地熱タービンの外観

ほとんどの地熱発電プラントはシングルフラッシュ発電またはダブルフラッシュ発電であるが、NAP 地熱発電所はトリプルフラッシュ発電を採用した。蒸気を分離した後の熱水を、さらに 2 段階で減圧沸騰させてタービンの中圧・低圧部に導入する。これにより、地熱エネルギーを最大限に利用でき、最大出力 140 MW という単機容量世界最大の地熱発電設備を実現させた。本設備の開発により、第 59 回電気科学技術奨励賞、低 CO₂ 川崎ブランド 2012 の大賞など、数多くの賞を受賞した。

5 あとがき

地熱発電は化石燃料を消費せず、また CO₂ の発生もほとんどないクリーンな発電である。地熱発電のいっそうの発展が期待されており、地熱発電設備のトップメーカーとして、地熱タービンの信頼性と性能の向上に努めていく。

今後とも、高性能で使いやすい地熱タービンを供給できるよう、着実に開発を進めていく所存である。

参考文献

- (1) 酒井吉弘ほか. 最新の地熱タービン. 富士時報. 2008, vol.81, no.5, p.314-319.
- (2) 中村憲司ほか. 蒸気タービンの最新技術. 富士時報. 2010, vol.83, no.3, p.201-206.



森田 耕平

蒸気タービンの基本設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場火力タービン部課長。ターボ機械協会会員。



佐藤 雅浩

蒸気タービンの設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場火力タービン部。ターボ機械協会会員。

地熱熱水利用バイナリー発電システムにおけるシリカスケール対策技術

Technology to Counter Silica Scaling in Binary Power-Generating System Using Geothermal Hot Water

川原 義隆 KAWAHARA Yoshitaka

柴田 浩晃 SHIBATA Hiroaki

久保田 康幹 KUBOTA Kokan

フラッシュ式地熱発電システムの還元熱水を熱源とする地熱熱水利用バイナリー発電システムは、地熱流体から効率良く熱を取り出すことができるので、高い経済性が得られる。しかし、熱水温度の低下に伴い、シリカスケールが発電設備や井戸に付着する懸念がある。東北水力地熱株式会社 葛根田蒸気基地での現地試験により、シリカ濃度の低い熱水の場合は、シリカ重合反応が停止しているため、温度によってシリカスケール付着速度が変わらないことを明らかにし、このシステムの実用化のめどを立てた。また、アルカリ間欠注入法により、シリカスケールの抑制・溶解が行えることを実証した。

A geothermal hot water binary power-generating system that uses reinjected hot water from a flash geothermal power-generating system as the heat source is able to draw heat from geothermal fluid efficiently, achieving high economic efficiency. However, there are concerns that cooling of thermal water causes silica scaling to adhere to power-plant equipment and wells. Field tests at the steam production well base in Kakkonda geothermal power plant of Tohoku Hydropower & Geothermal Energy Co., Inc. have proven that in thermal water with low silica concentration the speed of silica scaling is not affected by water temperature, because the silica polymerization reaction is halted; thus, practical use of the system is just in sight. Field tests have also proved that intermittent alkaline injection can help to prevent and/or dissolve silica deposits.

1 まえがき

地熱発電は、蒸気や熱水からなる地熱流体を地下から取り出し、発電に用いる。地下では高温・高圧の状態であるため、多くの成分が地熱流体中に溶解しており、これらの成分が発電設備の腐食やスケール付着の原因となることがある。特に、地熱流体から熱を回収し流体の温度が低下すると、熱水からシリカが析出してスケールとなりやすい。そのスケール対策の費用は、地熱発電の経済性に大きな影響を与える。

富士電機は、地熱流体から効率良く熱を取り出して活用することを目的に、その際に課題となるシリカスケールの対策技術を開発してきた。本稿では、特に地熱熱水利用バイナリー発電システムにおけるシリカスケール付着速度評価技術とシリカスケール抑制・溶解技術について述べる。

2 地熱熱水利用バイナリー発電システム

地熱発電には大きく分けて、フラッシュ式とバイナリー式の2通りの方式がある。フラッシュ式は、井戸（生産井）から取り出した地下の地熱蒸気と熱水の混合流体から、セパレータにより蒸気だけを分離し、蒸気タービンへ送って発電する方式である。バイナリー式は、地熱流体を熱源として、水と比べて沸点の低い媒体と熱交換を行い、気化させた媒体をタービンへ送って発電する方式である。

富士電機がこれまで実績を積み重ねてきたフラッシュ式地熱発電は、高温・高圧の地熱蒸気が必要であり、発電可能な地熱資源の確保が課題の一つであった。

図1に、地熱流体の温度と出力による地熱発電システムの適用範囲の概念を示す。地熱流体温度が高く、出力が大きい場合にはフラッシュ式を、温度が低く、出力が小さい

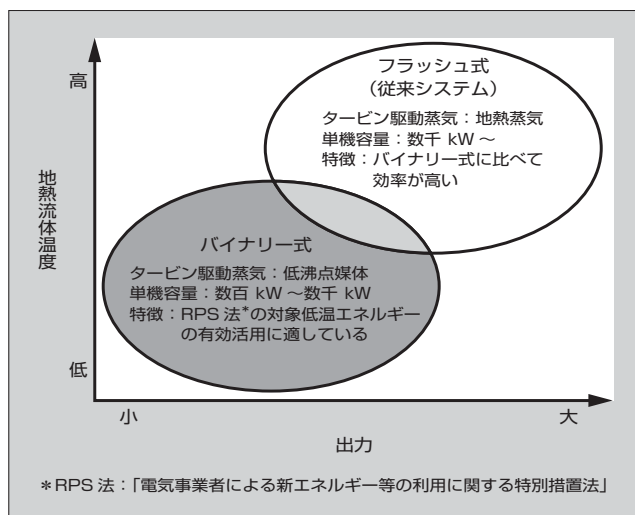


図1 地熱発電システムの適用範囲

場合にはバイナリー式を適用する。

富士電機は、地熱発電システムの品ぞろえを充実させるため、バイナリー発電システムの商品化開発を行ってきた。2006年8月から2009年10月まで、鹿児島県霧島市の大和紡観光株式会社 霧島国際ホテルの協力の下、定格出力150kW、最大出力220kWの地熱蒸気利用のバイナリー発電システムの実証試験を行い、計画どおり連続運転を達成した。そして、実証試験の結果を反映して商品化を完了した。

地熱発電の課題の一つとして、地熱熱源の確保が挙げられる。地熱発電の熱源となる地熱流体を地下から取り出すには、貯留層と呼ばれる高温・高圧の水がある場所を狙って生産井を掘る必要がある。生産井から十分な地熱流体が取り出せなかった場合には、あるいは取り出せる地熱流体の熱量や流量が減衰した場合には、生産井を追加すること

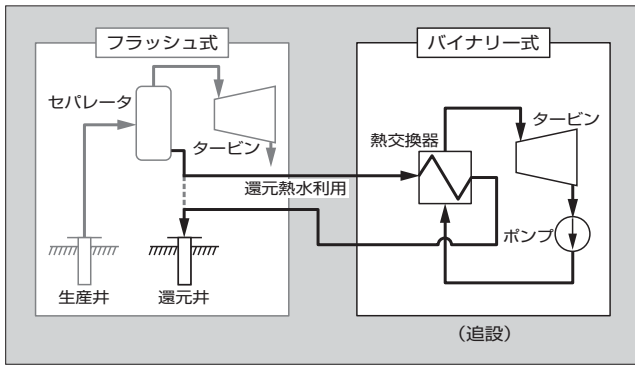


図2 地熱熱水利用バイナリー発電システムの概念図

となる。熱源としての地熱は一般に無尽蔵と捉えられているが、経済性の観点からは、地熱流体は有限の資源と考えることが必要である。

富士電機は、地熱流体を用いて効率良く発電するために、地熱熱水利用バイナリー発電システムを推進している。これは既存のフラッシュ式の地熱発電システムに、還元熱水を熱源としたバイナリー発電システムを追設するものでハイブリッド地熱発電と称している。これまで、地熱流体から蒸気を分離した後に残る還元熱水は、高温で未利用のまま井戸（還元井）へ戻していたが、本システムは、これを熱源として利用するものである。地熱熱水利用バイナリー発電システムの概念図を図2に示す。

地熱熱水利用バイナリー発電システムは、敷地、人員、送電線など既存のフラッシュ式地熱発電システムのインフラを活用できるため高い経済性がある。また、新たな生産井を掘ることもなく、“掘り当て”に失敗する事業性リスクも低い。しかし、還元熱水から熱を回収し、還元熱水の温度が低下することは、シリカスケールの付着を伴うことが多く、シリカスケール対策が検討課題として挙げられる。シリカは、地上の配管や弁類に付着することもあるが、最も大きな問題は、還元井内およびその周りの地層で付着し、還元井が閉塞（へいそく）することである。この場合は、還元井を浚渫（しゅんせつ）あるいは掘り直すことが必要となり、事業性を損なうことになる。

富士電機では、シリカスケールの問題が地熱熱水利用バイナリー発電システムを適用する際の大きなリスクになると考え、シリカスケール対策技術、具体的には、スケール付着速度評価技術および抑制・溶解技術の開発を行ってきた。

本開発は、東北水力地熱株式会社の協力の下、葛根田蒸気基地における地熱熱水利用バイナリー発電システムのフィージビリティスタディー（FS）の一つとして行ったものであり、東北水力地熱株式会社、地熱エンジニアリング株式会社、九州大学との共同研究によるものである。

3 シリカスケール付着速度評価技術

地熱流体は、地下で高温・高圧の状態が存在するため、多くの成分を溶解している。地上に取り出す際や地上で減

圧してフラッシュ（蒸発）させる際、熱水から熱回収を行う際などに、流体の濃縮および温度低下が起こる。このとき、特にシリカ成分は非晶質シリカに対して溶解度以上の濃度、すなわち過飽和の状態となり、濃縮するほど、また、温度が低下するほど、シリカが析出する可能性が高まる。地熱熱水利用バイナリー発電システムを追設することにより、還元井の閉塞速度が悪化するのかどうか、また、その度合いが許容できるレベルかどうかを、事前に定量的に評価する必要がある。

3.1 シリカスケールの生成メカニズム

(1) 非晶質シリカの特徴

地熱熱水からシリカが析出する場合は、非晶質の状態での析出する。非晶質シリカは、過飽和となったシリカが重合反応を起こして成長し析出する。したがって、シリカ重合反応速度 V が、シリカ析出速度を決める主要因となる。

シリカ重合反応速度 V は、簡略化すると式(1)で表すことができ、反応速度定数 K が大きいほど、非晶質シリカの溶解度 C_e が小さいほど、大きくなる。

$$V = K(C - C_e)^n \dots\dots\dots (1)$$

- V : シリカ重合反応速度
- K : 反応速度定数
- C : シリカ濃度
- C_e : 非晶質シリカ溶解度
- n : 定数 ($n > 0$)

K と C_e は、温度が高いほど、pHが高いほど大きな値となる。したがって、 V は温度と pH に関してあるところで極大値をとるような関係性を持つ。ただし、典型的な地熱熱水の場合、温度が低いほど、pHが高いほど、 V が大きくなる。

これらのことから、一般的にシリカスケール対策として、還元温度を下げないことおよび硫酸を注入して pH を下げることが行われる。

(2) 地熱発電所におけるシリカスケールの生成メカニズム

シリカスケールの生成は重合反応速度のみで議論されることが多いが、地熱発電所内でのシリカスケールの生成を考える場合は、発電所内の各位置におけるシリカの形態を考慮する必要がある。

還元井は還元熱水が貯留層に影響を与えないように、生産井と離れた場所に掘る場合が多く、生産井から還元井まで熱水が流れるのに、数時間かかることも少なくない。この間に、重合反応がどの程度進行しているか、どの程度粒子として析出しているか、熱水中でシリカ重合反応は進行しているか、などを総合的に考慮して、還元井におけるシリカスケール付着速度の評価を行う必要がある。

3.2 シリカスケール付着速度の評価方法

シリカスケールの付着が問題となるのは、還元井、中でも特に還元井近傍の地層である。このため、そこにおける閉塞速度を事前に評価する模擬地層試験装置を開発した。

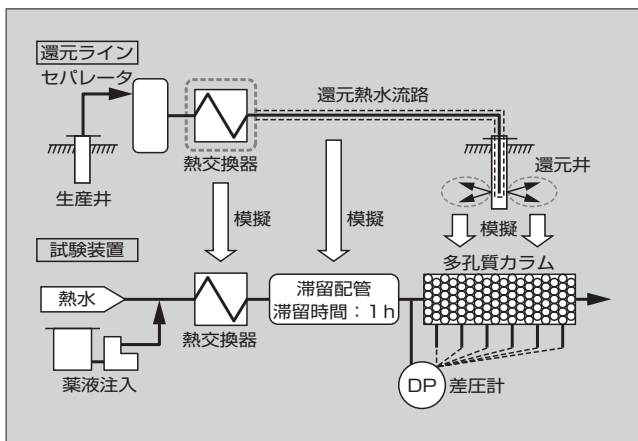


図3 模擬地層試験装置の概念図

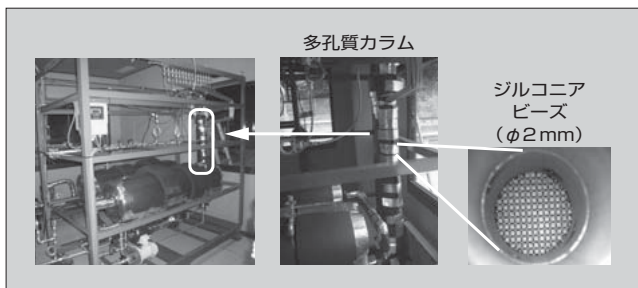


図4 模擬地層試験装置の外観

表1 バイナリー発電設備と模擬地層試験装置の対応

バイナリー発電設備	模擬地層試験装置
熱交換器	熱交換器
バイナリー発電設備設置場所から還元井近傍の地層までの還元熱水流路	滞留配管
還元井近傍の地層	セラミックビーズを充填した多孔質カラム

図3に試験装置の概念図を、図4に試験装置の外観を示す。

模擬地層試験装置は、地熱発電所内に設置し、熱水温度低下による還元井の閉塞速度の変化を評価するものである。バイナリー発電設備と模擬地層試験装置の対応を表1に示す。

多孔質カラム入口と多孔質内の各ポイント間の差圧をモニタリングすることで閉塞速度の評価を行う。また、滞留配管の各位置におけるシリカ濃度を測定することで、シリカ濃度の減少速度、すなわちシリカ重合反応速度を評価する。

3.3 葛根田蒸気基地におけるフィージビリティスタディー

2011年7～9月、東北水力地熱株式会社 葛根田蒸気基地において地熱熱水利用バイナリー発電システム設備の設置時におけるシリカスケール付着速度の事前評価を目的に、FSを実施した。

地熱熱水利用バイナリー発電システムに用いる予定の熱水を用い、模擬地層試験装置によってシリカスケール付着速度の評価を行った。熱水温度は120℃と95℃、全シリ

カ濃度は435ppmであり、120℃と95℃において1時間熱水を保持した場合に、シリカ重合が進行しないことを確認した。つまり、この1時間において、シリカ粒子が生成することや、既に生成したシリカ粒子が成長することはないといえる。なお、1時間とは、模擬地層試験の実施場所、すなわちバイナリー発電設備の設置予定箇所から還元井近傍の地層まで熱水が流れるのにかかる時間を模擬している。

3週間の模擬地層試験により、シリカスケール付着速度について次の知見が得られた。

- (a) 地層の閉塞に寄与しているのは、粒子凝集体の形状をしたスケールであり、スケール付着速度は温度に依存しない。
- (b) スケール付着速度が温度に依存しないのは、スケール付着の主メカニズムが粒子の付着であるためと考えられる。
- (c) 硫酸注入は、一般にシリカ重合速度を低下させることを目的としているが、粒子の付着防止にも効果があると考えられる。

試験結果とこれらの知見に至った根拠を次に示す。

(1) スケール付着速度の温度依存

図5に、3週間の試験が終了した後の多孔質カラムへのシリカ付着量を示す。硫酸注入なしと硫酸注入ありのそれぞれの条件において、熱水温度低下の前後(120℃と95℃)で、スケール付着量に差がないことが分かる。

また、硫酸注入なしの条件においては、カラム入口付近でスケール付着量が多くなった。図6に、多孔質カラムに付着したスケールの電子顕微鏡写真を示す。多孔質カラム全体にわたってビーズ表面にフィルム状のスケールが、カラム入口ではビーズ表面に粒子の凝集体が観察された。熱水中に含まれている粒子が、カラム入口で凝集してビーズに付着するため、カラム入口のスケール付着量が多くなっていると考えられる。さらに、多孔質カラムの透水性の測定結果からは、主にカラム入口において透水性が低下していることが分かった。地層の閉塞に寄与しているのは、粒子凝集体の形状をしたスケールであり、そのスケール付着速度は温度に依存しないといえる。

(2) スケール付着のメカニズム

熱水中でシリカ重合が進行していないことから、カラム

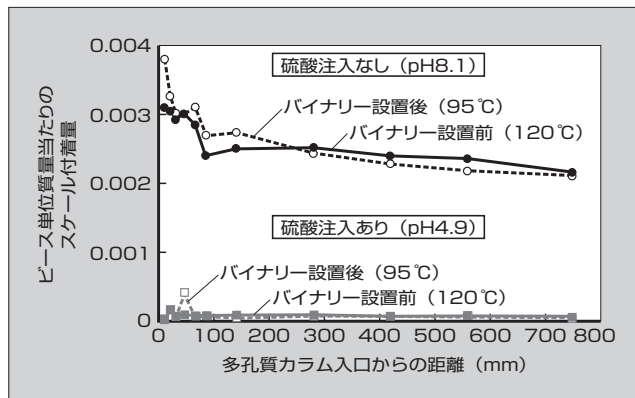


図5 模擬地層試験結果

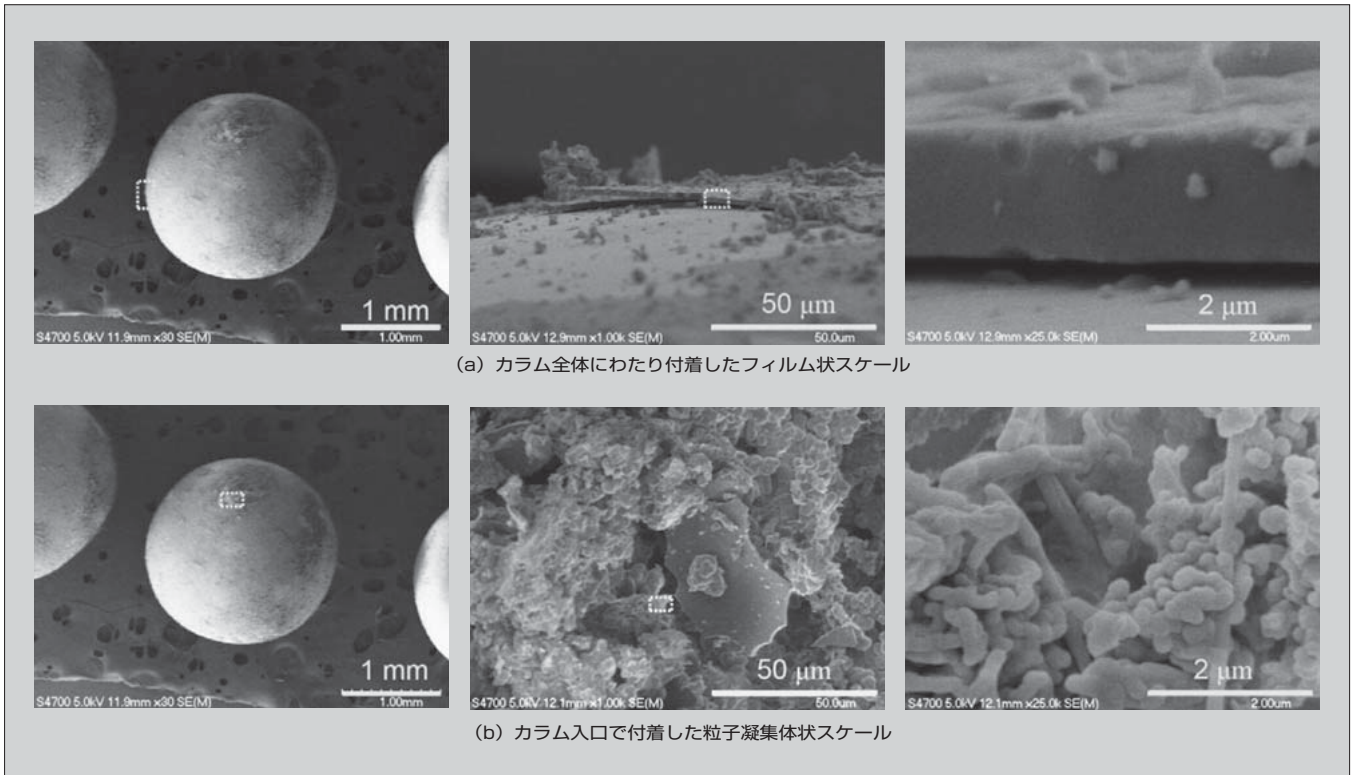


図6 ビーズに付着したスケールの電子顕微鏡写真

入口で付着した粒子は、フラッシュ時に局所的に熱水が濃縮して生成した粒子、あるいは生産井から飛来した粒子など、シリカ重合とは異なる要因で生成したものと考えられる。これらの粒子がカラム入口付近で付着したのがスケール付着の主要因であるため、スケール付着速度が熱水温度に依存しなかったと考えられる。

(3) 硫酸注入による効果

図5に示すとおり、硫酸注入によってスケール付着速度が大きく低下している。一般に硫酸注入はシリカ重合速度を低下させることを目的として行われるが、粒子の付着防止にも効果があると考えられる。

3.4 還元熱水の可能性

葛根田蒸気基地におけるFSの結果は、地層の閉塞速度が温度に依存しない、すなわち地熱熱水利用バイナリー発電システム設置時に、シリカスケール付着が大きな問題とならないということを示している。地熱熱水利用バイナリー発電システムを適用する還元熱水には、元々シリカ濃度の低い熱水を用いることが多く、葛根田蒸気基地と同様の条件、すなわちシリカ重合が停止している場合が多い。したがって、この結果は、地熱熱水利用バイナリー発電システムを適用する場合において、一般性を持った結果になると考えられる。

これまで、還元熱水温度を低下させると還元井の閉塞速度が悪化すると考えられてきたが、シリカ重合が停止している温度範囲で、スケール付着の主メカニズムが粒子の付着である場合には、閉塞速度に変化がないことを明らかにした。

④ シリカスケール抑制・溶解技術

還元熱水の性状によっては、地熱熱水利用バイナリー発電システムの適用時に、還元井の閉塞速度が悪化する場合も想定される。そこで、新しい手法によるシリカスケール抑制・溶解技術を開発し、模擬地層試験装置により実証した。

3章で述べたとおり、熱水中に硫酸を注入してシリカスケールを抑制することが多いが、硫酸注入により配管類の腐食が懸念されるため、注入量には制約があり抑制の効果には限界がある。

他に、熱水を一定時間滞留して、シリカ粒子を成長させることで、シリカ粒子の付着性を低下させる滞留漕法（そうほう）や、スケール抑制剤の注入、熱水からのシリカ分の除去などの方法で、シリカスケールの抑制が試みられている。しかし、熱水性状によって効果が限定的である、経済的に見合わない、などの理由で一般的な技術として確立しているとは言えない。

そこで、シリカが高pHでは溶解度が高まることを利用して、シリカスケールを抑制・溶解するアルカリ注入法に着目した。これまでにも、いくつかの機関でアルカリ注入法が検討されたことはあるが、主に次の理由で実用化されてこなかった。

- (a) カルシウムなどの金属成分とシリカが結合し、非晶質シリカ以外のスケールが生成する。
- (b) アルカリ剤のコストが硫酸と比較して高い。

これらの課題に対し、次の対策で解決を図り、実用化に

に向けた開発を行った。

(a) カルシウムなどの金属成分をマスクする薬剤を併用する。

(b) 薬剤の間欠注入により注入量を減らす。

図7に、アルカリ注入法を適用したときのスケールの抑制結果を示す。アルカリ剤だけを注入した場合は、何も注入しなかったときよりもスケール付着量が増えるのに対し、金属成分をマスクする薬剤を併用することで、スケールが抑制される。

図8に、模擬地層試験装置において薬剤（アルカリ剤と金属成分のマスク薬剤）の間欠注入を行った際の多孔質カラム内の差圧の経時変化を示す。アルカリ剤の間欠注入（図における①②③の期間）を行うことにより、スケール付着前の差圧に戻る、すなわち付着したスケールを溶解し、透水性を回復できる。



図7 アルカリ注入法によるシリカスケールの抑制結果

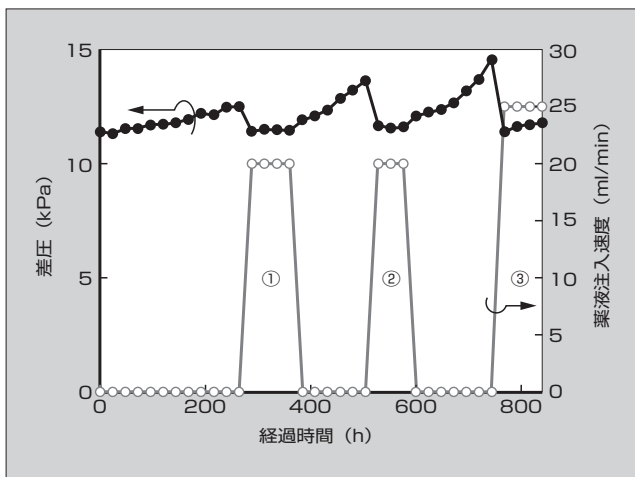


図8 間欠注入による多孔質カラム内の差圧の変化

5 あとがき

本稿では、地熱熱水利用バイナリー発電システムを適用する際の大きな課題であったシリカスケール対策について述べた。

シリカスケール付着速度評価技術、抑制・溶解技術を確立し、地熱熱水利用バイナリー発電システムの実用化にめどが立ったと考える。今後もこれらの技術を核に、地熱熱水利用バイナリー発電システム、さらには地熱発電全般のシリカスケール対策技術を確立し、地熱資源の有効な利用に貢献する所存である。

本開発においては、東北水力地熱株式会社殿に、フィールド提供などのご協力をいただいた。また、本開発は、東北水力地熱株式会社殿、地熱エンジニアリング株式会社殿、九州大学大学院工学研究院糸井教授、九州大学大学院理学研究院横山教授との共同研究によるものであり、貴重なアドバイスをいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) 山田茂登ほか. 地熱発電システムの取組みと最新技術. 富士時報. 2010, vol.83, no.3, p.196-200.
- (2) Kawahara, Y. et al. Laboratory Experiments on Prevention and Dissolution of Silica Deposits in a Porous Column (1): Solid Deposition due to Silica Particle Aggregation and Inhibition by Acid Dosing. Geothermal Resources Council Transactions. 2012, vol.36, p.867-870.
- (3) Fukuda, D. et al. Laboratory Experiments on Inhibition of Silica Particulate Deposition in a Porous Column by Dosing of Chemical Reagents into Reinjection Water (2): Prevention and Dissolution of Silica Deposits by Alkali Dosing. Geothermal Resources Council Transactions. 2012, vol.36, p.851-854.



川原 義隆

発電プラントのエンジニアリングに従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部火力・地熱プラント総合技術部主任。日本地熱学会会員。



柴田 浩晃

火力、地熱発電プラントエンジニアリングに従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部火力・地熱プラント総合技術部主任。



久保田 康幹

りん酸形燃料電池発電システムの開発、ヒートポンプの開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所応用技術研究センター熱応用研究部。化学工学会会員。

火力発電所向け蒸気タービンの最新技術

Latest Steam Turbine Technologies for Thermal Power Plants

和泉 栄 IZUMI Sakae

森山 高志 MORIYAMA Takashi

池田 誠 IKEDA Makoto

ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電は、発電効率が低い、CO₂排出量が少ないなどの特徴があり、採用が拡大している。コンバインドサイクル発電である沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所に、発電機と蒸気タービンとの間にクラッチを備えたことを特徴とする単車室軸流排気再熱蒸気タービンを納入した。また、オマーン・SUR プラントに、左右2方向排気の特徴とする二車室両サイド排気再熱蒸気タービンを納入した。火力発電所向け蒸気タービンにおける最新技術として、溶接技術、USC タービン技術および低圧翼の信頼性向上技術を開発している。

With features such as high power-generating efficiency and low CO₂ emission, combined-cycle power generation, combined with gas turbine and steam turbine, is gaining wider use. For Yoshinoura thermal power plant of The Okinawa Electric Power Company, Incorporated, which is a combined-cycle power generating facility, we supplied single-cylinder reheat steam turbines with axial-flow exhaust that feature a clutch between the generator and the steam turbine. Also, for SUR power plant in Oman, we supplied two-cylinder reheat steam turbines with double-sided exhaust that feature exhaust directions are left and right.

As the latest technologies in steam turbines for thermal power plants, we are developing welding technology, USC turbine technologies and technologies to improve reliability of low-pressure blades.

1 まえがき⁽¹⁾

発電プラントの熱効率向上という経済的効果と、温室効果ガスの排出量削減という社会的要請から、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電 (CCPP) の採用が近年拡大している。CCPP には、化石燃料をボイラで燃焼させる従来型の火力発電と比較して、発電効率がよく、燃料に天然ガスを用いるため CO₂ 排出量が少なく、ガスタービンと小型の蒸気タービンを組み合わせるため急速起動が可能で運用性が高いという特徴がある。

2012年11月に営業運転を開始した沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所は、ガスタービン、発電機と蒸気タービンを一軸上に配置した1on1型CCPPであり、単車室軸流排気再熱蒸気タービン (91 MW) を採用した。

2013年1月に出荷した韓国・DAEWOO E&C 社経由オマーン・SUR プラント CCPP は、2セットのガスタービンおよび発電機と1セットの蒸気タービンおよび発電機から構成された2on1型CCPPであり、二車室両サイド排気再熱蒸気タービン (330 MW) を採用した。

本稿では、これら二つのCCPP向け蒸気タービンの特徴を概説するとともに、富士電機の蒸気タービンの最新技術について述べる。

2 吉の浦火力発電所向け蒸気タービン

本設備は、沖縄電力株式会社が初めて燃料にLNGを採用した一軸式コンバインドサイクル発電設備である。2011年4月に1号機排熱回収ボイラの据付けを、7月にガスタービン本体の据付けを開始した。1号機は2012年5月に始まった試運転を経て、2012年11月に営業運転を開始した。引き続き2013年5月に2号機の営業運転開始を予



図1 吉の浦火力発電所向け蒸気タービン

定しており、工事・現地・関係各社が一丸となって試運転を推進している。採用した蒸気タービンの特徴を次に示す。

- (a) 一軸式コンバインドサイクル方式に対応するため、ガスタービンおよび発電機と^(注1)嵌脱(かんだつ)するためのクラッチを蒸気タービンロータ端に備えている。
- (b) 高中低圧タービンを1個のケーシングにまとめたコンパクトな高中低圧一体型タービンである。

吉の浦火力発電所向け蒸気タービンの外観を図1に示す。

2.1 クラッチの採用

吉の浦火力発電所で採用した一軸式コンバインドサイクル方式は、ガスタービンと発電機、蒸気タービンのロータを一軸上に配置する。ガスタービンおよび蒸気タービンがおのおの発電機を持つ二軸式に対して、発電所建屋を大幅

<注1> 嵌脱：結合させたり切り離したりすること

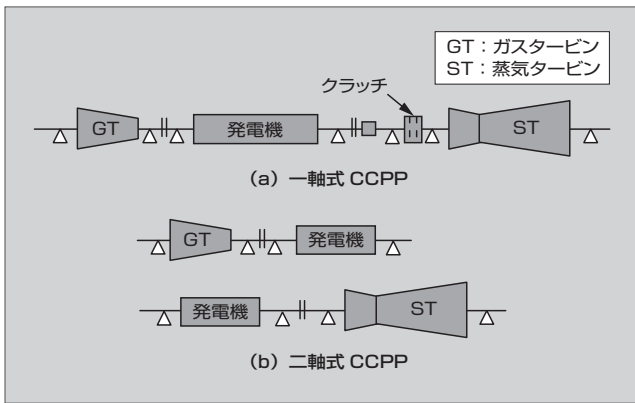


図2 一軸式CCPPと二軸式CCPPの構成

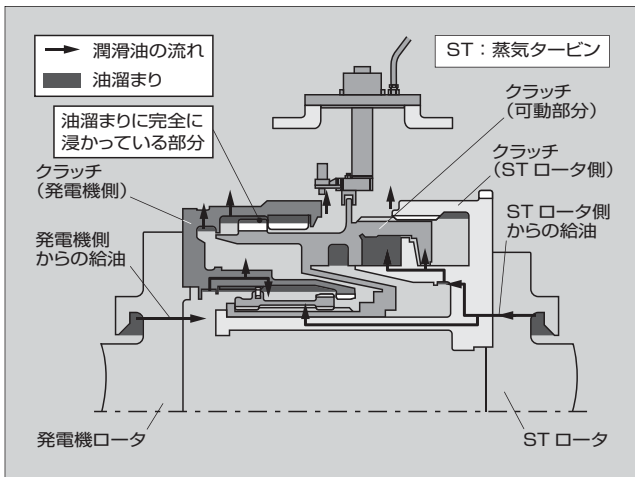


図3 クラッチの構造

に小さくすることができる。図2に一軸式と二軸式の構成を示す。一軸式においては、発電機を挟んで、ガスタービンと蒸気タービンが同じ軸に並ぶ。

コンバインドサイクル発電においては、ガスタービンの排熱を利用して蒸気タービンへ蒸気を供給するため、ガスタービンと蒸気タービンの起動のタイミングが異なる。そこで、ガスタービンと発電機から、蒸気タービンを一時的に嵌脱できるクラッチを採用した。

まず、クラッチが切り離された状態でガスタービンと発電機が起動され、蒸気タービンへ供給する蒸気が用意できた段階で蒸気タービンの弁を開き昇速を始める。その後、蒸気タービンロータの回転数が定格回転数に到達し、ガスタービンロータの回転数を上回った段階、つまり、蒸気タービン側から発電機側へのトルクが正になった段階で、クラッチが機械的に嵌合して、蒸気タービンからのトルクを発電機に伝える。

図3にクラッチ構造を示す。クラッチの潤滑油は、クラッチ両隣に位置する軸受から供給される。クラッチがいつ嵌合してもよいように、クラッチは常時給油される。この油はクラッチ嵌合時の衝撃を吸収するダンパの役割も担う。クラッチ内部の油の粘性により、蒸気タービン起動前の弁を開く前においても、ガスタービンの回転によって毎分400回転程度まで昇速する。

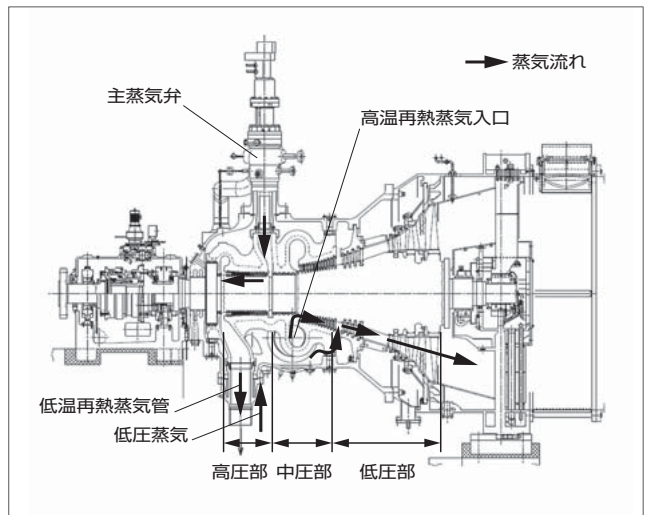


図4 吉の浦火力発電所向け蒸気タービン断面図

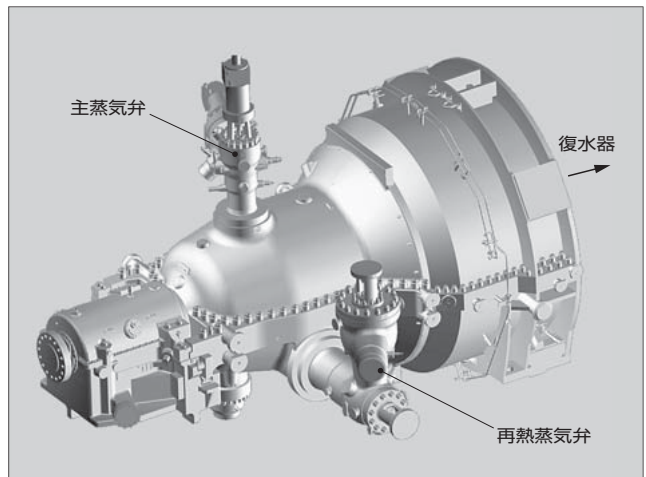


図5 吉の浦火力発電所向け蒸気タービン鳥瞰図

2.2 高中圧一体型タービン

吉の浦火力発電所向け蒸気タービンの断面図を図4に、鳥瞰（ちょうかん）図を図5に示す。

タービンは、高圧部、中圧部および低圧部で構成される。高温高圧の主蒸気は、ケーシング上部に位置する主蒸気弁を介してケーシング中央の高圧部へ流入し、膨張して仕事をした後、低温再熱蒸気管を通して一度排出される。再熱された蒸気は、ケーシング中央に位置する再熱蒸気弁を通して再びタービンへ導かれる。その後、蒸気は中圧部で仕事をした後、さらにケーシングへ供給された低圧蒸気と混合して低圧部へ導かれ、タービン軸方向に排出されて復水器へ至る。

従来、2ケーシングで構成していたタービンを1ケーシング一体構造にするため、次の構造を採用している。

- (a) 主蒸気弁をタービンケーシング上側に1組、再熱蒸気弁をタービンケーシング片側に1組配置する。
- (b) 高温部を中央に集めるため、高圧部と中圧部はカウンターフローを採用する。
- (c) 低圧蒸気入口をケーシング前側に配置し、内外ケー

シング間に蒸気の流れをつくることで、ケーシング上下温度差が生じにくい構造とする。

1号機および2号機の試運転において、蒸気タービン連続運転時と起動・停止時ともに、振動・上下温度差は小さく、良好な運転状態であることを確認した。

③ DAEWOO E&C 社経由 SUR プラント CCGP 向け蒸気タービン

本設備は、2台のガスタービンの排熱を利用して排熱回収ボイラで蒸気を発生させて発電する蒸気タービンであり、高圧部と中圧部の高中圧タービンおよび低圧部の低圧タービンの2台のコンポーネントから構成されている。

高温高圧の主蒸気は、ケーシング下部に位置する主蒸気弁を介してケーシング中央の高圧部へ流入し、タービン前側へ膨張して仕事をした後、低温再熱蒸気管を通して一度排出される。再熱された蒸気は、ケーシング中央下部に位置する再熱蒸気弁を通して再び高中圧タービンへ導かれる。その後、蒸気は中圧部で仕事をした後、クロスオーバー管の途中から供給される蒸気を混合して低圧タービンに供給される。低圧タービンで仕事を終了した後、低圧タービン両側に配置された復水器へ至る。

本タービンの特徴は次のとおりである。

- (a) 富士電機にとって最大容量の高中圧タービン
- (b) 両サイド排気式の低圧タービンによる建屋の高さの抑制

蒸気タービンの鳥瞰図を図6に、外形図を図7に、断面図を図8に示す。

3.1 330MW 高中圧タービン

従来、本設備向け（330MW）のクラスでは、高圧タービン、中圧タービンおよび低圧タービンから構成される三車室再熱タービンが適用されてきた。SUR プラント CCGP では、高圧タービンと中圧タービンのコンポーネントを一体にして、二車室再熱タービンにしてコンパクト化を図った。富士電機にとって二車室再熱タービンの従来の最大容量は210MW級であり、次に示す対策により大型

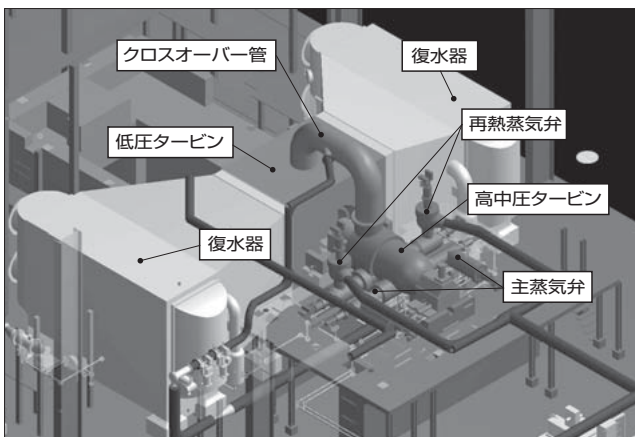


図6 SUR プラント CCGP 向け蒸気タービン鳥瞰図

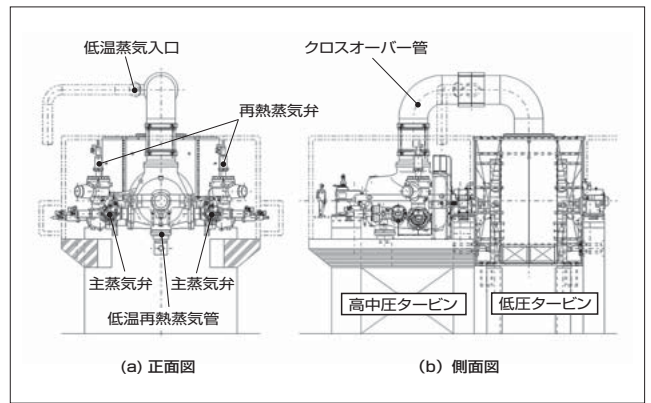


図7 SUR プラント CCGP 向け蒸気タービン外形図

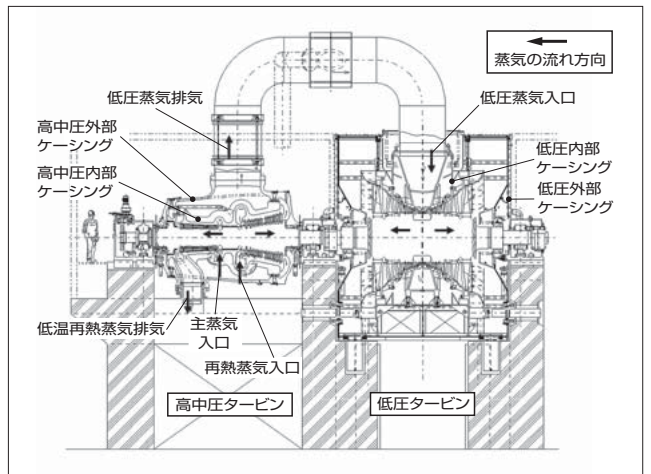


図8 SUR プラント CCGP 向け蒸気タービン断面図

化を図った。

コンパクト化を図った内部ケーシングを冷却するため、図8に示すように内部ケーシングと外部ケーシングからなる二重ケーシング構造とし、タービン内部に作用する圧力および温度を両ケーシングで分担することにより体積のコンパクト化を行うとともに、両ケーシングの間に中圧部排気蒸気を流すことにより、内部ケーシングを冷却できるようにした。また、高圧排気蒸気が高圧外部ケーシングに直接触れないLリング構造で排気することにより、外部ケーシングの材料に低グレード鋳鋼もしくは鋳鉄を採用している。さらに、外部ケーシングのコンパクト化および定期点検時のメンテナンス性についても考慮し、図7(a)に示すように主蒸気弁および再熱蒸気弁を高中圧タービンの下部左右に配置した。

3.2 両サイド排気式の低圧タービン

低圧タービンのケーシングは、低圧内部ケーシングと低圧外部ケーシングで構成される。高中圧タービンから排出された蒸気は、クロスオーバー管を介して低圧内部ケーシングに導かれる。その後、蒸気は真空まで膨張し、低圧内部ケーシングと低圧外部ケーシングの間を通過して復水器へ排出される。従来、排気はタービン直下に配置された復水器に出す構造となっていた。この構造では、体積の大きい

復水器がタービフロアの下に配置されることでタービン建屋が高くなり、建設コストが掛かる欠点があった。本設備では図6に示すとおり、低圧タービンの両サイドに復水器を配置することにより、タービン建屋の高さを低く抑え建設コストを抑制した。両サイド排気型の低圧外部ケーシングの開発に当たっては、下向き排気型と同等の蒸気流路面積の確保、真空力に耐えうるように内部構造の補強の検討、タービン固定点の検討およびメンテナンス性を考慮した分割方法の検討を行った。低圧内部ケーシングについては実績のある構造を適用することにより、従来同様の品質を確保した。

4 蒸気タービンの最新技術

4.1 溶接技術

(1) 異種材ロータ溶接技術⁽²⁾

単車室蒸気タービンのロータ材には、高温蒸気にさらされる部位におけるクリープ強度と、低温蒸気にさらされる部位における強靱（きょうじん）性という相反する特性が要求される。これまでは、軸心に作用する遠心力の大小、すなわち低圧翼の長短や回転数の大小に応じて、高価であるが強靱性の高い2%Cr鋼と、強靱性は低いが安価な1%Cr鋼とを使い分けていた。近年は、2%Cr鋼でも強靱性が不足する長大低圧翼の適用が必要なプラントがある。このため、高温域におけるクリープ強度の高い1%Cr鋼製ロータと低温域において2%Crよりも強靱性の高い3.5%Ni鋼製ロータの溶接技術を開発した。本技術は、素材メーカーが限定される2%Cr鋼製ロータの代替としても水平展開が可能であるため、ロータ素材の調達性が向上した。図9に、異種材溶接ロータを適用した蒸気タービンを示す。

(2) ロータ補修溶接技術

年月を経たプラントにおいては、高温で使用されたロータの表面部位に熱疲労によるクラックが認められる場合がある。クラックを残存させたままタービンを運転することは極めて危険である。新しいロータを製作するためには

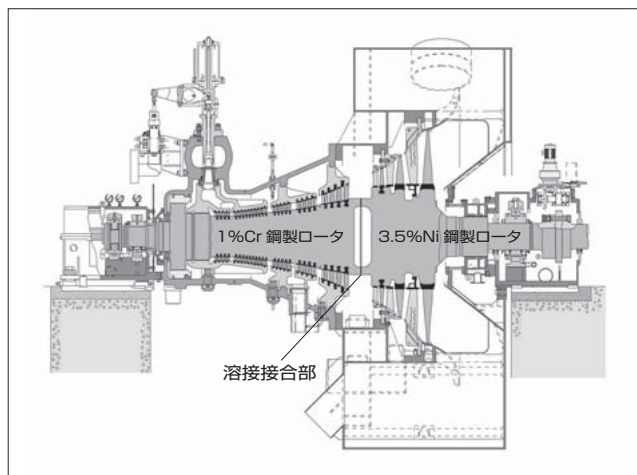


図9 異種材溶接ロータを適用した蒸気タービン

プラントを長期にわたり停止する必要があるため、顧客の逸する利益は莫大（ばくだい）になる。プラントの停止期間を最小とするために、クラック発生部位の溶接補修技術を開発した。

(3) 鋳鉄品の溶接補修技術

鋳鉄は複雑な熱処理工程が不要で材料欠陥が少ないため、高温強度の要求されない中低温域で使用する場合には鋳鋼と比較して製作期間が短く安価であるという利点を持っている。しかし、鋳鉄は欠陥部の溶接補修が困難であるため、強度を必要とする部位に許容サイズを越える欠陥が認められた場合には廃却・再製作を余儀なくされる。

実機鋳鉄品の余丁部より切り出した試験材に対して、溶接試験を行い、非破壊試験の結果から最適な溶接条件を確立した。溶接試験は、狭い範囲の溶接に適したガスシールドタングステンアーク溶接（GTAW）および広い範囲の溶接に適したシールドメタルアーク溶接（SMAW）の2種類の溶接法を用いて、下向きおよび横向きの2方向の溶接姿勢で、Ni系、Fe-Ni系およびインコネル系の3種類の溶加材を用いて実施した。

4.2 USCタービン技術⁽³⁾

(1) USC適用材料の国産化

石油や天然ガスが政情の不安定な地域に偏在しているのに対して、石炭は地球上の広範囲に分布しているため、エネルギーセキュリティ上の観点から石炭火力発電は重要な電源と位置付けられている。

その一方で石炭火力発電は、化石燃料（石油、ガス、石炭）を用いる火力発電の内、最もCO₂排出量が多いため、近年、建設される大容量石炭火力発電においては蒸気条件をより高温高圧化し、発電プラントの熱効率を向上させたUSC（超々臨界圧火力発電）プラントが主流となってきている。

富士電機は、2002年にシーメンス社製の蒸気タービンを採用した、主蒸気温度600℃、再熱蒸気温度610℃のUSCプラントを手がけた。このとき高温部位に使用された改良12%Cr鋼製の主要材料は、全て欧州製であった。

USCプラントに適用される主要材の調達先は限定されるため、主要材の調達性拡大はUSCタービンを内製化する上で重要なポイントとなる。富士電機は国内素材メーカーと共同で、改良12%Cr鋼製のロータ材とケーシング材の試作試験を行い、製造技術および材料劣化・脆化（ぜいか）評価手法を確立し、主要材の国産化にめどを付けた。図10に、試作した改良12%Cr鋼製ロータを示す。

(2) 余寿命診断技術

年月を経たプラントの蒸気タービンの更新には多大な費用と準備期間が必要となるため、適切な時期に余寿命診断を行い計画的な更新計画を立てる必要がある。

USCプラントよりも蒸気条件の低い亜臨界圧プラントおよび超臨界圧プラントに適用される1%Cr鋼については、材料の劣化特性と脆化特性に関するマスターカーブが既に得られている。しかし、USCプラントに適用される



図 10 改良12% Cr 鋼製試作ロータ

改良 12%Cr 鋼については、材料の劣化特性と脆化特性に関するマスターカーブがいまだ得られていない。このため、余寿命診断の基礎技術を確立する目的で、鹿児島大学と共同でマスターカーブ取得のための研究を進めている。

4.3 低圧翼の信頼性向上技術

(1) 腐食モニタリング技術

主蒸気の酸導電率^(注2)が高くなると、低圧翼部における応力腐食割れ (SCC) の可能性が高くなることが知られている。主蒸気の性状管理はボイラの側で行われていること、また応力腐食割れを起こすのはボイラ出口から遠く離れた低圧翼部であることから、タービン内部の蒸気性状をリアルタイムで計測し、応力腐食割れのリスクの有無を的確に把握する必要がある。

このため、東北大学と共同で腐食モニタリングセンサを開発し、フィールドテストを実施している。図 11 に、腐食モニタリングセンサの取付図を示す。腐食モニタリングセンサは、pH、塩素イオン濃度、腐食電位を測定できるセンサで構成され、腐食成分が濃縮されやすい隙間部の腐

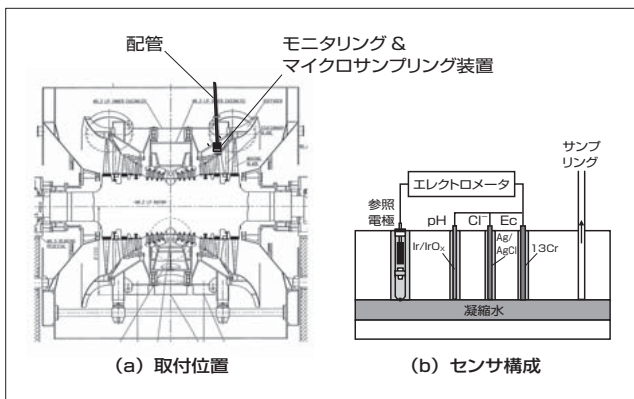


図 11 腐食モニタリングセンサ取付図

〈注2〉酸導電率：陽イオン交換樹脂を通過させて陽イオンを水素イオンに置換した後に測定される電気伝導率をいう。サンプル中に微量に含まれる塩化物イオンや硫酸イオンなどの有害な陰イオン濃度を検出するために用いる。

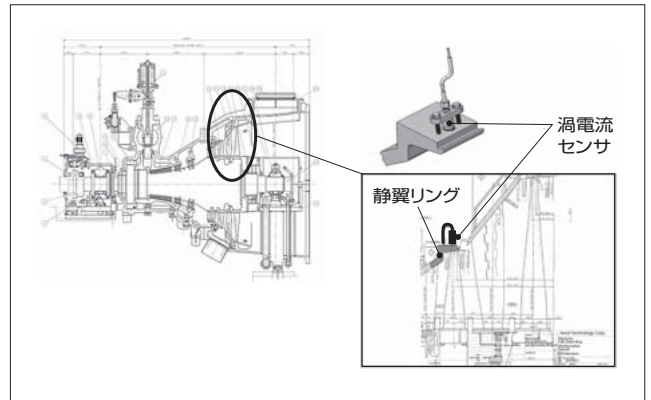


図 12 振動モニタリングセンサ取付図

食環境をオンラインでモニタリングすることができる。さらに、マイクロサンプリング装置により、タービン内部の蒸気をサンプリングして分析することが可能である。

(2) 振動モニタリング技術

長大低圧翼の振動特性は複雑であるため、適用実績のない低圧翼を実機に採用する場合には、工場バランス試験時に加速度センサを取り付け、回転振動試験を行うことで実特性を確認している。

しかしながら、工場バランス試験が常温の真空中で行われるのに対して、実機条件は、温度、圧力、流量の変化する蒸気中であることから、実特性を把握するためには、発電所において各運転条件の下で低圧翼の振動を計測する必要がある。そこで、運転中の低圧翼の振動計測を行った。図 12 に振動モニタリングセンサの取付図を示す。低圧翼先端に対向する静翼リングの周上に非接触式の渦電流センサを複数個取り付けて、運転中の個々の翼の振動をオンラインで連続で測定することに成功した。センサをチタン製のケースに格納することにより、長期間にわたる翼振動モニタリングが可能になった。

5 あとがき

2011年3月11日に発生した東日本大震災以降、日本の原子力発電所は順次停止され、再稼動の見通しがまだ立っていない。原子力発電所の停止が長引く中、今後の電源の主役は再生可能エネルギーとコンバインドサイクル発電と目されている。

石炭火力発電においては、USC に対して CO₂ 排出量をさらに低減できる A-USC (先進超々臨界圧火力発電) や IGCC (石炭ガス化複合発電) の研究開発が進められている。今後とも、高性能で運用性の高い蒸気タービンを供給するため技術開発を行っていく所存である。

参考文献

- (1) 池田忠志ほか. コンバインドサイクル発電設備. 富士時報. 2005, vol.78, no.2, p.116-120.
- (2) 今村清司ほか. 蒸気タービンロータの異種材料溶接技術. 富士時報. 2004, vol.77, no.2, p.146-149.

- (3) 酒井吉弘ほか. 富士・シーメンスの大容量高温・高圧タービン. 富士時報. 2000, vol.73, no.12, p.644-649.



和泉 栄

蒸気タービンの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場主席。日本機械学会会員。



森山 高志

蒸気タービンの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場火力タービン部課長。ターボ機械協会会員。



池田 誠

蒸気タービンの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場火力タービン部主任。ターボ機械協会会員。



一軸式コンバインドサイクル発電設備用全含浸絶縁水素間 接冷却タービン発電機

Global VPI Insulated Indirectly Hydrogen-Cooled Turbine Generator for Single-Shaft Type
 Combined Cycle Power Generation Facilities

山崎 勝 YAMAZAKI Masaru

新倉 仁之 NIIKURA Hitoshi

谷藤 怜 TANIFUJI Satoshi

富士電機は、全含浸絶縁システムの空気冷却タービン発電機において多くの実績を持っている。沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所 1・2号機向けに全含浸水素間接冷却タービン発電機的设计・製作を行った。これは、構造・製造方法の多くを空気冷却タービン発電機と基本的に同一とする両軸駆動の一軸式コンバインドサイクル発電設備用の発電機である。実績から得られたデータや通風解析および強度解析により、最適化や信頼性の向上を実現している。各種試験において、性能を満足する結果を得ており、現地でも良好な運転状態にある。

Fuji Electric has a great deal of experience in air-cooled turbine generators for global VPI insulation systems. We designed and built global VPI indirectly hydrogen-cooled turbine generators for Yoshinoura thermal power plant No. 1 and No. 2 of The Okinawa Electric Power Company, Incorporated. These are double-end drive generators for a single-shaft, combined cycle power generation facilities that use many of the same basic construction and manufacturing methods as air-cooled turbine generators. Using data obtained through experience and results from ventilation analysis and strength analysis, we are achieving optimization and increased reliability.

Through each type of test, we are obtaining results that satisfy performance expectations and we are seeing favorable operating conditions at the power plants.

1 まえがき

ガスタービンと小型の蒸気タービンから構成されているコンバインドサイクル発電方式は、発電効率や運用性が良く、環境負荷が低いという利点があり、近年、広く採用されるようになった。また、この発電方式は急速起動が可能のため、DSS (Daily Start & Stop) 運用が容易に行え、昼夜の電力需要の格差が大きい場合にも対応が可能であり、今後ともいっそう需要は増加するものと予想される⁽¹⁾⁽²⁾。

このたび富士電機が、沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所 1・2号機向けに設計・製作した発電機は、一軸式コンバインドサイクル発電設備用の全含浸絶縁システムを適用した水素間接冷却タービン発電機である。本稿では、その特徴と適用技術について述べる。

2 一軸式コンバインドサイクル発電設備の特徴

コンバインドサイクル発電設備には、ガスタービン-発電機-蒸気タービンを一軸上に並べた一軸式と、ガスタービン発電設備と蒸気タービン発電設備を別に設置する多軸式とがある。一般に一軸式発電設備では、複数系列を設置し、それぞれ独立して運用することができる。発電必要量が

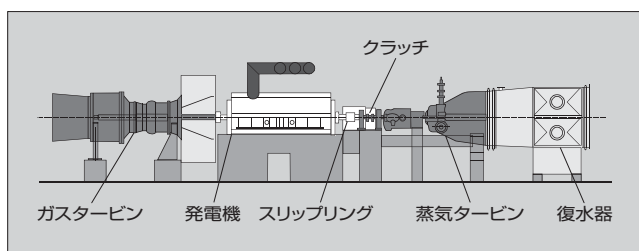


図1 一軸式コンバインドサイクル発電設備の構成例

減ったときには系列単位で停止し、他の系列が定格負荷で運転できるようにする。これにより、プラント全体の部分負荷効率を高く保つことができる。図1に、富士電機とシーメンス社の協業による一軸式コンバインドサイクル発電設備の構成例を示す。

3 発電機の特徴

発電機的主要仕様を表1に、断面図を図2に示す。この水素間接冷却タービン発電機は、固定子巻線、固定子鉄心および回転子巻線の構造と製造方法を、空気冷却タービン発電機と基本的に同一とした。そのため、空気冷却タービン発電機での多くの実績、共通技術および設備の共有化などに基づく高い信頼性を得ることができた。

表1 300MVA 水素間接冷却タービン発電機的主要仕様

項目	仕様
出力	300 MVA
電圧	16,000 V
力率	0.85
周波数	60 Hz
冷却方式	固定子: 水素間接 回転子: 水素直接
水素ガス圧力	0.4 MPaG
冷媒温度	43 °C
回転速度	3,600 min ⁻¹
励磁方式	サイリスタ直接励磁
全長	13.1 m
全質量	325 t

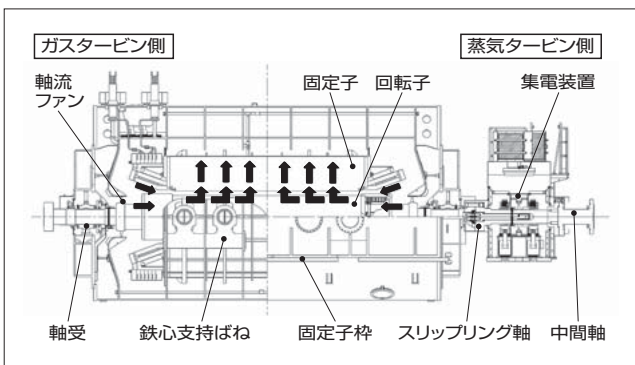


図2 300 MVA 水素間接冷却タービン発電機の断面図



図4 鉄心支持ばね

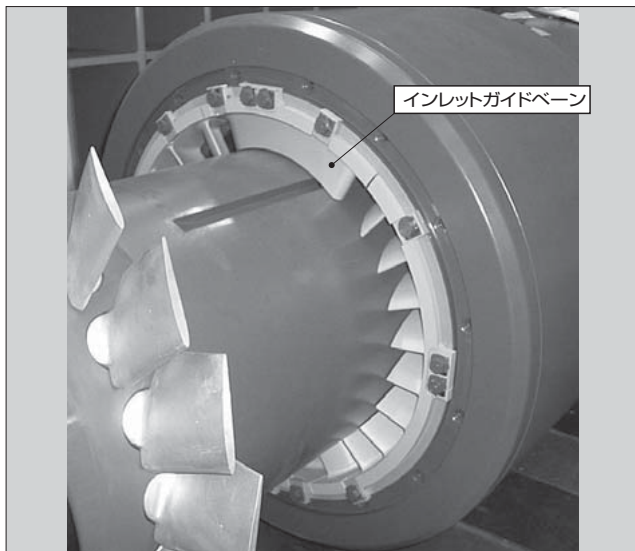


図3 インレットガイドベーン

バインドサイクルの両運転が可能である。いずれの運用も発電機の定格回転速度と危険速度とが近づかないよう配慮し、十分な振動応答の検討を行っている。

(2) スリップリング軸材

発電機の回転子は、両軸駆動となり、駆動トルクが伝達される。また、短絡事故時に耐え得る強度を備える必要から、スリップリング軸材に、発電機の軸材と同一のNiCrMoV鋼を採用している。

(3) 絶縁カップリング

回転子軸は、運転中に発生する起電力により、主軸、軸受および二つの軸受を結ぶ構造物の間を電流が還流し、発電機の運転に支障をきたす恐れがある。そこで、電流が還流しないように、軸受には電流回路を遮断するための絶縁を施している。今回は中間軸の軸受を介して電流が還流しないように、スリップリング軸と中間軸間の接続には絶縁カップリングを適用している。

3.1 冷却方式

本発電機は、固定子の冷却に水素間接冷却方式を採用している。通風経路については、図2の矢印に示すように、回転子両端の軸流ファンから固定子および回転子の各部に冷却ガスが送り込まれ、固定子の冷却ガスの流れは全て内径側から外径側へ流す方式としている。

これらの冷却や通風方式は、富士電機が数多くの実績を持つ空気冷却タービン発電機と同じ方式であり、試作実験機や実績から得られたデータを基に設計され、最適な冷却ダクトの配置と冷却風量の分布によって、巻線温度分布の均一化を図っている。

また、回転子に対しては、コイル各部の冷却風量の均一化を図るため、図3に示すインレットガイドベーンを保持リング支え内径部に設け、冷却性能の向上を実現している。

3.2 回転子の構造

図1に示すとおり、一軸式コンバインドサイクル発電設備では、発電機の両端にガスタービンと蒸気タービンを配置しているため、次の配慮をしている。

(1) 軸系全体での曲げ・ねじり振動応答計算

本発電設備は、ガスタービンシンプルサイクルとコン

3.3 固定子の構造

固定子鉄心は、圧力容器である円筒状の固定子枠に図4に示す鉄心支持ばねを介して支持されている。適切なばね効果によって鉄心の電磁振動が固定子枠に伝わるのを抑制する構造である。

4 全含浸絶縁技術

固定子の絶縁には、富士電機が長年実績を積んできた全含浸絶縁技術と、国内最大の規模で、世界でも屈指の全含浸製造設備を用いた全含浸絶縁システムを適用している。

全含浸絶縁固定子を図5に示す。固定子巻線と鉄心は一体で絶縁樹脂を含まれることから、鉄心と巻線、くさびが強力に固着して緩みにくくなるため、信頼性が向上し、メンテナンスも低減することができる。また、巻線と鉄心との間に樹脂で充填され空隙がないことから、巻線から鉄心への放熱性が良くなり、巻線単体で含浸する方式に比べて

<注> シンプルサイクル：燃料を用いる原動機で発電のみ行うエネルギーシステムをいう。

特集 創エネルギー技術—発電プラントと新エネルギー—

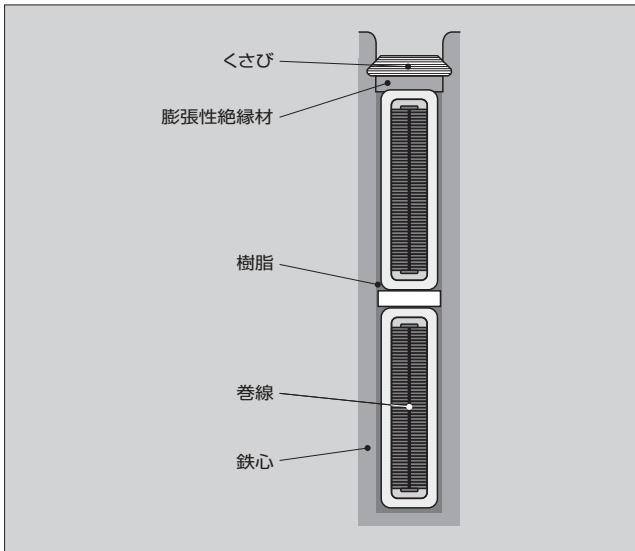


図5 全含浸絶縁固定子

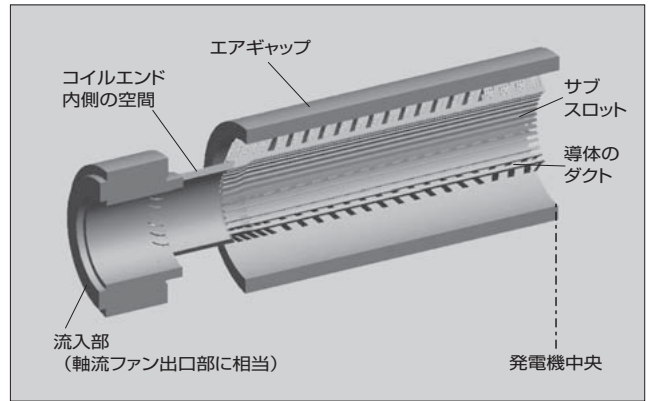


図7 回転子の通風解析モデル

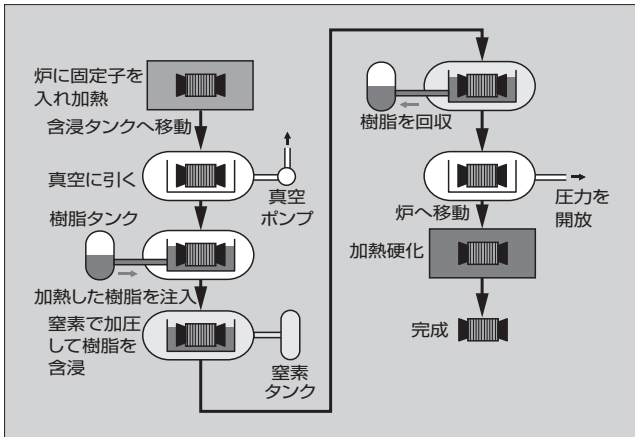


図6 全含浸絶縁工程

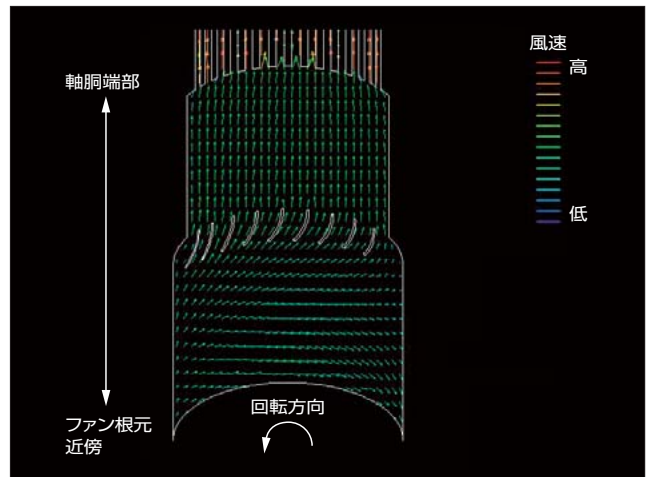


図8 回転子コイルエンド部の通風解析結果の例

冷却性能が向上するなどの利点がある。

全含浸絶縁の含浸処理工程を図6に示す。主絶縁材であるマイカガラステープなどを導体に巻いた後に、巻線を固定子鉄心スロットに挿入し、所定の巻線接続を行う。次に、固定子と巻線とを一体でエポキシ樹脂槽にて真空含浸させる。この工程は、一度に全ての巻線に樹脂含浸の処理をするため、大型の発電機では極めて重要である。このため、樹脂の粘度、硬化剤の配合比などを厳密に管理し、モニタリングシステムによって含浸処理工程における温度、真空度、加圧時の圧力および巻線の静電容量を測定することで、樹脂の含浸について状態の常時監視と制御を行う。

5 解析技術

5.1 通風解析

通風解析では、近年のハードウェアやソフトウェアの性能向上によって、解析モデルの要素数を以前に比べて多くすることが可能になり、発電機機内の冷却のような複雑な流れでも比較的精度の高い計算ができるようになってきている。また、回転中の回転子内部の流れを実測することは非常に

困難であるが、熱流体解析を用いることで流れの分布などの精度の高い把握が可能になっている。全含浸絶縁水素間接冷却タービン発電機的设计においても、流体解析を用いて最適な通風冷却を実現している。

回転子コイルエンド部の流れ解析例を紹介する。図7に、回転子の通風解析モデルを示す。軸端の軸流ファンの出口部、コイルエンド内側の空間、導体のダクトおよびエアギャップをモデル化している。回転子を定格速度で回転させた状態での流れ場計算とし、解析領域への入口となる軸流ファン部および出口となるエアギャップなどの境界条件には、別途実施の風量分布計算値を用いて解析を行った。図8に、回転子コイルエンド部の通風解析結果の例を示す。

5.2 強度解析

コンバインドサイクル発電の特徴である高頻度起動停止における信頼性を確保するために、回転子保持リング焼きばめ部の強度解析を実施した。回転子保持リングは、回転時の遠心力下での回転子コイルエンドを保持するため、所定の焼きばめ代で回転子軸端部に焼きばめを行う。静止時には回転子軸端部に対して焼きばめ部に圧縮応力が発生し、回転時には遠心力による保持リング径の拡大によりその圧縮応力が解放され、起動停止により繰り返し応力が発生する。そのため、応力の集中を避けるとともに、繰り

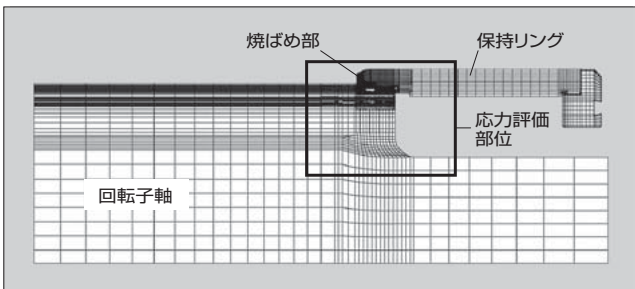


図9 保持リングの強度解析モデル

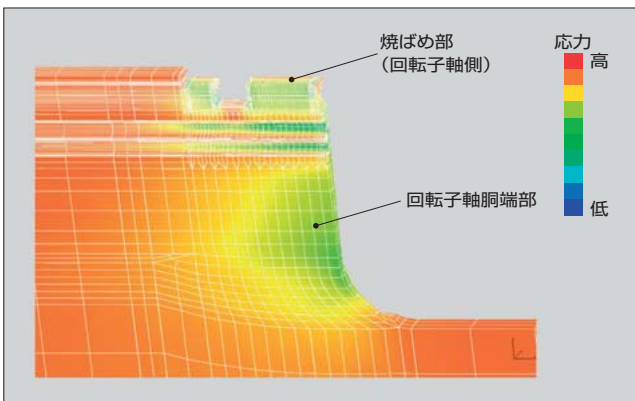


図10 回転子軸胴端部の応力分布解析の結果(応力評価部位)

返し応力に対する信頼性の検討を行った。

図9に保持リングの強度解析モデルを示す。保持リング焼きばめ部は、構造が複雑であるため強度解析は三次元モデルで行っている。また、応力の状態を正しく模擬するためにひずみと応力の非線形性を考慮し、保持リングと回転子との焼きばめ面は接触要素とした。図10に、回転子軸胴端部の強度解析の例として応力分布解析の結果を示す。

6 関連設備

6.1 クラッチの採用

発電機と蒸気タービンの間には、伸び差を吸収し自動着脱のできるクラッチを設置している。これにより、ガスタービンおよび蒸気タービンは、起動停止時の温度変化によって生じる熱膨張の差やスラスト荷重に対して独立した設計が可能となる。また、蒸気タービンとは関係なくガスタービンの起動・停止が可能であり、起動・停止時の損失が低減できる。

6.2 静止形周波数変換装置(SFC)の採用

ガスタービンの起動は、静止形周波数変換装置(SFC)により発電機を同期電動機として駆動させる方式である。このSFCはコンバータとインバータから構成され、ガスタービン起動昇速に必要な電圧・周波数を発電機固定子へ供給する。また、昇速中の発電機励磁電源は励磁装置から供給される。この方式を採用することにより、起動用電動機などが不要になり、軸系および全体配置をシンプルにしている。また、電気設備だけで構成しているため、保守が

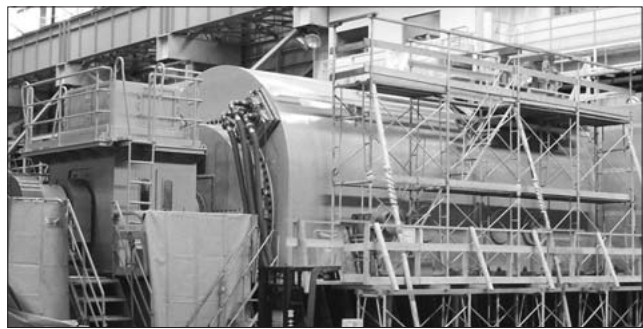


図11 工場試験中の全含浸絶縁水素間接冷却タービン発電機

容易となる。

7 工場試験結果

2010年6月に、無負荷飽和特性試験、三相短絡特性試験、損失特性試験、温度上昇試験、三相突発短絡試験および過速度試験を実施し、各種性能を確認した。工場試験中の全含浸絶縁水素間接冷却タービン発電機を図11に示す。工場試験結果は、仕様を満足して設計値とよく一致し、良好な結果となっている。

8 あとがき

沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所1・2号機向け一軸式コンバインドサイクル発電設備用全含浸絶縁水素間接冷却タービン発電機について、その特徴と適用技術を中心に述べた。1号機は2012年5月からの試運転を経て、11月に営業運転が開始され、良好な運転状態にある。また、2号機は2013年5月に営業運転が開始される予定である。今後も市場ニーズに応じて技術開発を行い、高品質・高信頼性のタービン発電機を製作していく所存である。

参考文献

- (1) 池田忠司ほか. コンバインドサイクル発電設備. 富士時報. 2005, vol.78, no.2, p.116-120.
- (2) 前沢重男ほか. “創立60周年記念 火力原子力発電 最近の10年の歩み IV-3. タービン発電機”. 火力原子力発電. 2010, p.80-89.
- (3) 木村誠ほか. 全含浸絶縁水素冷却タービン発電機の完成. 電気学会回転機研究会. 2007, RM-07-43.



山崎 勝

大型回転機的设计・開発に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場回転機部課長。



新倉 仁之

大型回転機の電気設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場回転機部主任。電気学会会員。



谷藤 怜

大型回転機の設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場回転機部。



大規模太陽光発電システム技術

Technology for Large-Scale Photovoltaic Power Generation Systems

中川 雅之 NAKAGAWA Masayuki

項 東輝 XINAG Donghui

太陽光発電システムの国内市場は、大規模太陽光発電（メガソーラー）に拡大し、高効率・高信頼性・省スペースのニーズが高まっている。富士電機は、沖縄電力株式会社 安部メガソーラー向けに機器・遠方監視制御システムを含めた機電設備一式を納入し、2012年3月末から運転を開始した。パワーエレクトロニクス技術を用いた高効率大容量パワーコンディショナや大規模監視制御システムを適用している。また、再生可能エネルギーの大量導入時の電力系統における課題を解決するため、安定化システムを用いた離島向けマイクログリッド実証設備などを通じ、系統連系技術を開発している。

The market for photovoltaic power generation systems in Japan is expanding to large-scale photovoltaic power generation (mega solar), and the need for high efficiency, high reliability, and compact equipment increases. Fuji Electric supplied a package of mechanical and electronic equipment for Abu mega-solar plant of The Okinawa Electric Power Company, Inc. including devices for a solar power generation system and a remote surveillance control system, which commenced operation in the end of March 2012. We have applied a highly-efficient, high-capacity power conditioner utilizing the power electronics technology and a large-scale surveillance control system.

We are also developing system-interconnection technologies to resolve issues that would arise in the power grid with large-scale implementation of renewable-energy power production through microgrid verification equipment using stable systems etc. for remote islands.

1 まえがき

1997年12月の気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）で「京都議定書」が採択され、温室効果ガスの削減が明確化されて低炭素社会を目指すことになった。政府は太陽光発電の導入を推進するため、一般的にメガソーラーと称する出力が1MW以上の大規模太陽光発電施設の導入支援などを行った。2011年3月の東日本大震災を受けて、政府は原子力発電の代替エネルギー確保のために再生可能エネルギーの開発を加速する方針を打ち出した。さらに、2012年7月の「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」の開始を受けて、電力会社以外の一般企業や自治体が、売電用または自家発電用に太陽光発電設備を建設する事例が増加している。

富士電機は、1980年から国内外に太陽光発電システムを納入してきている。本稿では、この実績に基づく大規模太陽光発電システム技術について述べる。

2 富士電機の太陽光発電のシステムソリューション

富士電機は、発電設備、変電設備、工場設備などで培ったプラント技術を生かし、太陽光発電システムおよび実証設備を国内外に多数納入してきた。また、世界に先駆け“薄く・軽く・曲がる”フィルム型アモルファス太陽電池を開発し、納入してきている。

図1に、太陽光発電システムへの取組みの全体像を示す。太陽電池の選定から特別高圧・高圧設備、電力系統連系設備、需給制御システムの設計・施工・メンテナンスまでを行っている。メガソーラーの導入に当たっては、さまざまな手続きや技術的な検討に多くの時間を要するため念な

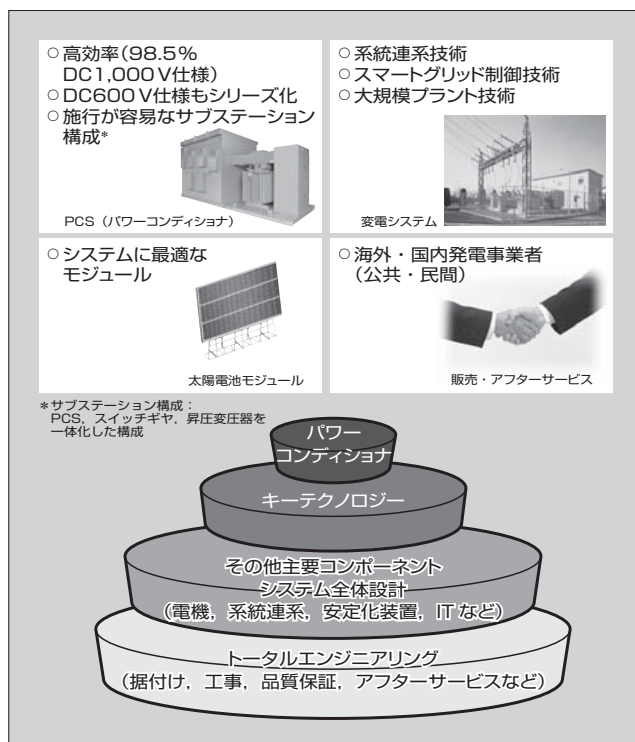


図1 太陽光発電システムへの取組み

計画が必要である。土地の取得、設置される環境条件の調査、買取制度および補助金を考慮した投資・回収の検討、ならびに設備の保安に関する種々の関連法令への適合などである。

図2に示すようにメガソーラーなどの太陽光発電システムは、太陽電池、アレイ、接続箱、集電箱、パワーコンディショナ（PCS）、連系設備、環境計測装置および監視制御システムから構成される。その導入手順を図3に示す。また、システム計画の要点は次のとおりである。

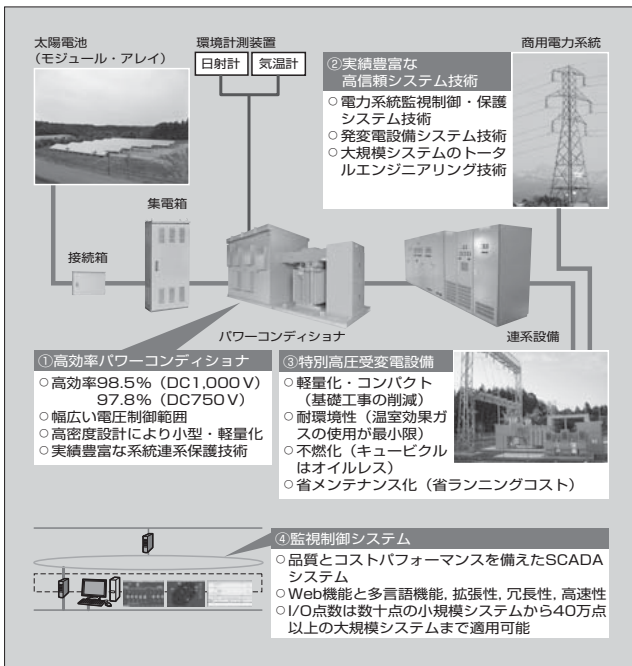


図2 太陽光発電システムの構成

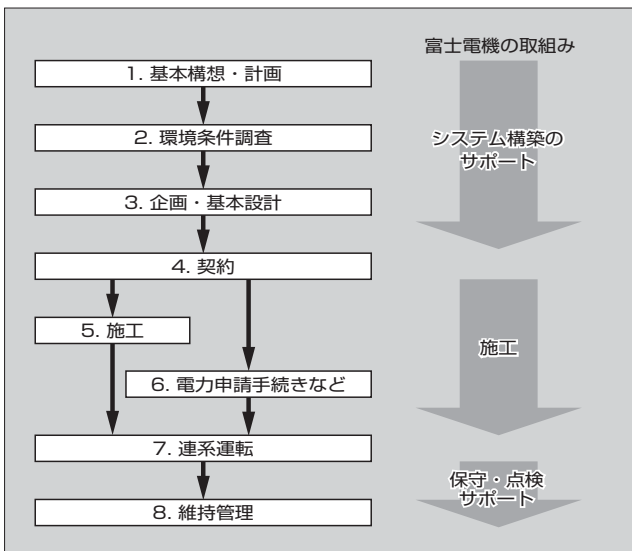


図3 太陽光発電システムの導入手順

- 太陽電池は、単結晶や多結晶などの結晶系、アモルファスや多接合型などの薄膜系、ならびにシリコンを使わないCIGSの化合物およびその他の有機系など多くの種類がある。それぞれ特徴があり、コスト・発電効率に差がある。国内外の太陽電池メーカーから設置環境や金額などの条件を踏まえて顧客の要望を考慮し、最適な太陽電池を選定する。
- アレイは、環境・設置面積・コストなどを考慮し、傾斜角、太陽電池の取付け方向、列数・段数を計画する。
- 接続箱や集電箱は、最適な太陽電池の直列数および送電ロスを考慮した配置を検討して分岐数を設計し、設置環境を考慮して計画する。
- PCSには、トランスレスで高効率な大容量機を適

用する。

- 連系設備用開閉装置には、22～77kVクラスではSF₆ガスまたは環境にやさしいドライエアーを採用したキュービクル型ガス絶縁開閉装置を適用し、それ以上のクラスでは、SF₆ガス絶縁開閉装置を適用する。
- 連系設備用変圧器には、高効率な鉱油または環境にやさしいパームヤシ油を採用した油入変圧器を適用する。
- 環境計測装置は、エネルギー管理・環境啓発などを目的として、日射計をアレイの傾斜に合わせて設置し、外気温計を直射日光の当たらない場所に設置する。
- 監視制御システムには、接続箱単位での電流・電圧の計測および遠隔での監視制御が行えるように、大規模なI/O点数処理に適したCitectSCADAを適用する。
- 直流側の設計では、「電気設備に関する技術基準を定める解釈の一部改正について」（2012年6月29日、経済産業省原子力安全保安院）により、「太陽電池発電設備の施設に係る規定」が改定され、PVケーブルを高圧の範囲（直流1,500V以下のものに限る）で使用することが可能になった（図4）。

表1に、直流600V配電と1,000V配電のシステム比較を示す。現在、主流である直流600V配電に比べて直流1,000V配電は、理論的には電池の直列数を10/6に増やすことができ、並列数を6/10に減らすことが可能である。これにより、PVケーブルの本数および接続箱・集電箱の数を減らすことができ、発電コストの低減および発電ロスの低減が可能になる。富士電機は、直流1,000V配電方式も積極的にシステム計画に盛り込んでいる。

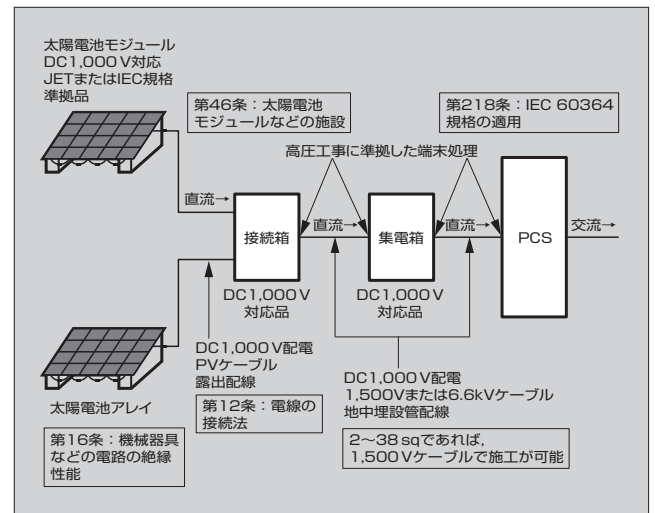


図4 太陽光発電設備の施設例および関連する技術基準

〈注〉 CitectSCADA：フランス Schneider Automation, Inc. の商標または登録商標

表1 直流600V配電と1,000V配電のシステム比較

	直流 1,000V 配電	直流 600V 配電
回路区分		
回路イメージ	<p>DC600V回路に比べて並列数減・直列数増</p> <p>並列回路数 (60%)</p> <p>直列回路数 (160%)</p> <p>回路電圧 DC1,000V</p>	<p>並列回路数 (100%)</p> <p>直列回路数 (100%)</p> <p>回路電圧 DC600V</p>
直流側機器数量および工事費	<ul style="list-style-type: none"> ○ 接続箱：60% ○ 接続箱～太陽電池間ケーブル：60% ○ 接続箱～集電箱間ケーブル：60% ○ PCS：DC1,000Vの大容量機による数量減 ○ 工事費：配線・据付け個数の減少により減少 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 接続箱：100% ○ 接続箱～太陽電池間ケーブル：100% ○ 接続箱～集電箱間ケーブル：100% ○ PCS：DC600V機 ○ 工事費：配線・据付け個数に比例
直流側送電損失*	60%	100%

*送電損失=電流²×ケーブル抵抗
太陽電池の電流はどちらも同じであるため、送電損失はケーブル抵抗(同一径であれば長さ)に比例する。

3 沖縄電力株式会社 安部メガソーラー向け太陽光発電システム

図5に安部メガソーラーの全景を示す。沖縄電力株式会社は、CO₂の排出削減とゼロエミッション電源比率の向上に資するため、太陽光発電を導入した場合の電力系統への影響に関する知見を得ることを目的として、沖縄県名護市へ発電出力1MWの安部メガソーラーを導入した。富士電機は、機器・遠方監視制御システムを含めた機電設備一式を納入し、2012年3月末から運転を開始した。

太陽電池は、沖縄県の気象条件に適した太陽電池の評価を目的として2種類(CIGS型、アモルファスシリコン+多結晶シリコン多接合型)の薄膜太陽電池を採用している。

図6に、安部メガソーラーのシステム概要を示す。本設備の特徴は次のとおりである。

- (a) 発電所と本店の2か所での監視制御および支店での監視
- (b) 発電電力制御および無効電力制御を実現
- (c) アレイの設置角度による発電電力量などの比較が可能



図5 安部メガソーラーの全景 (写真提供：沖縄電力株式会社)

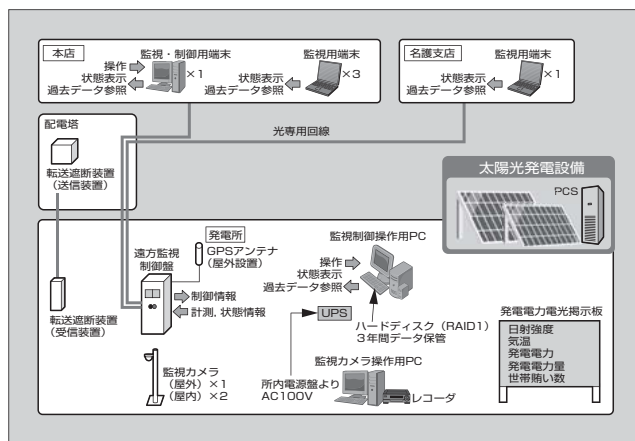


図6 安部メガソーラーのシステム概要

能

(d) 大容量 500 kW PCS × 2 式の適用

4 大容量パワーコンディショナ

メガソーラーは、太陽電池のワット単価を下げることに同時に、主要な構成要素であるPCSの発電単価を下げることに、高い信頼性が求められる。このため、PCSは高効率、トータルコストの低減、ならびにシステムに接続するための高信頼性を実現する必要がある。

そこで、これらを実現した「PVI1000シリーズ」および「PVI750シリーズ」を製品化した。PVI1000シリーズの外観を図7に、PVI750シリーズの外観を図8に示す。

表2にPCSの仕様を示す。主な特徴は次のとおりである。

- (a) AT-NPC (Advanced T-type Neutral-Point-Clamped) 3レベルIGBTモジュールを適用し、世界最高レベルの効率98.5%を実現している。
- (b) 1,000 kW および 750 kW PCSは、昇圧変圧器とPCSを同一ベース上に一体化させたサブステーションタイプとしており屋外設置が可能である。設置場所に応じて標準仕様と耐塩仕様を用意している。設置コストを低減するためエアコンによる冷却を不要とした。

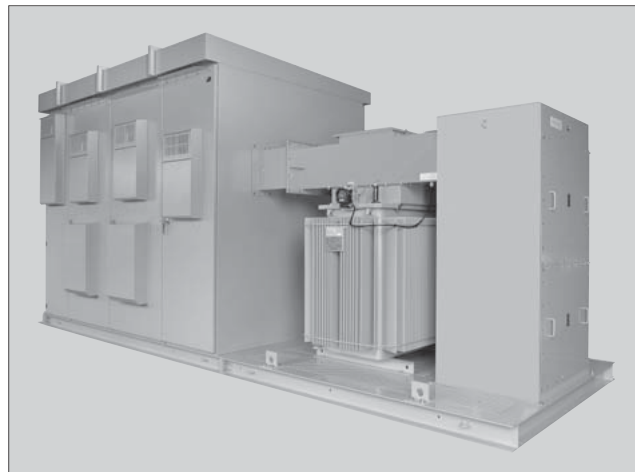


図7 「PVI1000シリーズ」



図8 「PVI750 シリーズ」

表2 PCS の仕様

項目	製品		
	PVI1000-3/1000	PVI750-3/750	PVI750-3/500
定格出力	1,000kW	750kW	500kW
最大直流入力電圧	1,000V	750V	750V
直流入力電圧 (MPPT 範囲)	460 ~ 850V	320 ~ 700V	320 ~ 700V
直流入力分岐回路数	4 (オプション: 24)	4 (オプション: 24)	5
PCS出力電圧	AC270V (-12~+10%)	AC200V (±10%)	AC200V (±10%)
装置最高効率	98.5%	97.8%	97.7%
設置場所・方式	屋外パッケージ (PCS+TR+LBS一体型)	屋外パッケージ (PCS+TR+LBS一体型)	屋内 (PCS・直流入力盤) (屋外設置時は別途筐体必要)
冷却方式	強制空冷	強制空冷	強制空冷 (別途エアコン必要)
寸法	W 6,150× D 2,400× H 2,830 (mm)	W 6,150× D 2,400× H 2,830 (mm)	W 2,400× D 900× H 1,950 (mm)
質量	約13,000kg (昇圧TR+LBS盤含む)	約12,200kg (昇圧TR+LBS盤含む)	約2,000kg (PCS・直流入力盤)
騒音	85 dB以下	85 dB以下	75 dB以下

内蔵ファンのみで冷却することができるため、冷却用の電源容量は2kW程度である。

- (c) 高信頼性を図るため、FRT (Fault Ride Through) 機能を標準で搭載した⁽¹⁾。
- (d) 250kWユニットの交流回路および直流回路を並列構成とすることで、ユニットの一つが故障しても、富士電機のサービス員により不具合ユニットを外して残りの健全ユニットで運転継続ができる。

- (e) 1,000kW PCSは、最大直流入力電圧は、世界標準の1,000Vである。さらに、装置の安全規格としてIEC 62109 (太陽光発電システムで使用する電力変換装置の安全性) の第三者認証を取得している。

5 メガソーラー用監視制御システム

メガソーラーにおける監視制御システムは、発電所の発電状況ならびに太陽電池、集電箱およびPCSなどの設備故障の早期発見、設備の稼働状態の把握、長期の保守運用において重要な役割を果たす。

具体的には、データ収集や通信ネットワークなどによる設備故障の早期発見、設備のトレンド分析に基づく予防保全による発電所の稼働率の向上、ならびに現場での保守点検工数の低減による保守運用費用の低減などであり、発電事業者の利益の最大化に寄与する。

富士電機の太陽光発電用監視制御システムは、汎用のSCADAパッケージであるCitectSCADAをベースに開発した。このため、さまざまなメーカーの発電設備に対応できるとともに、高信頼性と高いスケーラビリティを持っている。

5.1 監視制御システムの構成

図9に監視制御システムの構成を示す。メガソーラー設置エリアにデータ収集を行うリモートステーション (RS) 盤と通信ネットワーク設備を、センターハウスにマスターデータ収集装置と監視サーバを設置する。なお、富士電機のPCSを適用した場合は、RS盤の機能をPCSに統合することが可能である。

また、データ通信は、EthernetやRS-485などのハード構成、ならびにTCP/IPやMODBUSなどのオープンプロトコルに準拠している。さらに、広域ネットワーク環境を利用すれば遠隔地から監視制御を行うこともできる。

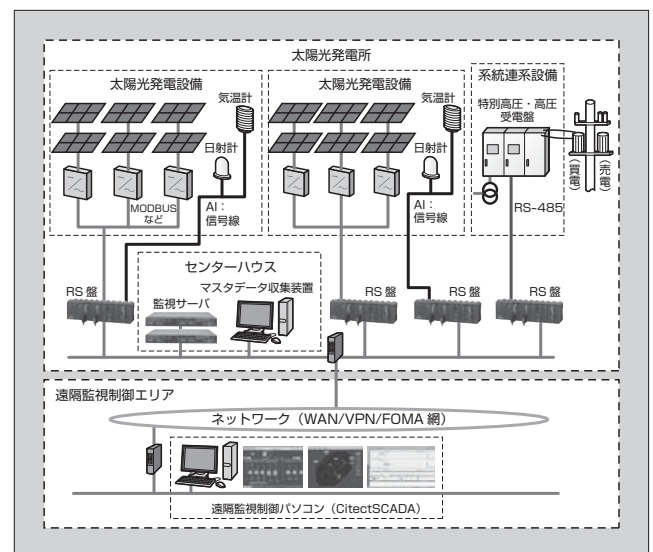


図9 監視制御システムの構成

5.2 監視制御システムの特徴

監視制御システムは、高機能監視制御 SCADA パッケージ (CitectSCADA) をベースにして構築しているため、次の特徴を持つ。

- (a) CitectSCADA は、社会インフラ、産業などさまざまな分野で幅広い支持を得て、全世界で既に 50,000 ライセンスを超える納入実績があり、信頼性が高い。
- (b) Web サーバ用と表示用サーバで設計され、高速性、拡張性、冗長性がある。

① 高速性

データ通信を常に最適化し、不要な通信を低減することで、大規模なシステムでも高速なデータ収集・表示が可能である。

② 拡張性

計測信号は 75 点から 40 万点まで拡張でき、小規模から大規模まで多様なシステムに対応が可能である。

③ 冗長性

通信やサーバの構築において、簡単な設定で完全な冗長化構成が可能である。万が一、ネットワークやサーバに障害が発生した場合でも、運用に支障が出ない安全なシステムが実現できる。

- (c) I/O, アラーム, トレンド, 表示, 帳票の五つの機能をシステムの規模に合わせ、複数台のサーバに分散させることが可能で、超大規模システムまで適用が可能である。

- (d) Web 機能および多言語対応機能により、いつでも世界中のどこからでも、太陽光発電システムの情報を得ることが可能である。



図 10 監視画面の例

5.3 監視制御システムの機能構成

監視制御システムの主要な監視対象は次のとおりである。

- (a) 系統連系設備
- (b) PCS
- (c) 太陽光発電設備 (接続箱・集電箱)
- (d) 気象などの環境の情報

標準の監視画面および主な機能を表 3 に、監視画面の例を図 10 に示す。

富士電機の監視制御システムは、標準の監視制御システム機能のほか、顧客の個別ニーズに応えるオプション機能も備えている。例えば、CSV ファイルの自動生成による他システムとの連携や、電力会社からの発電出力の抑制要求に対応するために行う PCS の台数制御など、さまざま

表 3 標準監視画面および主な機能

標準監視画面	主な機能
広域監視オーバービュー 個別エリアオーバービュー スケルトン監視画面 発電状況監視画面 気象情報画面 トレンド監視画面 アラーム監視画面	Web機能 多言語対応機能 プロセスアナリスト機能 セキュリティ機能 メール発報機能 帳票機能 (年報・月報・日報) 他システム連携機能

な拡張機能を柔軟に構成することが可能である。

6 マイクログリッドへの取組み

太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーの出力は、設置場所の日射・気温などの環境条件の影響を受けるため不安定である。将来、大量に電力系統に連系されると、余剰電力の発生や電圧変動、周波数変動などの悪影響が電力系統へ及ぶことが懸念されており、これらの課題を解決する必要がある。

富士電機は、九州電力株式会社と沖縄電力株式会社の離島向けに、蓄電池およびキャパシタを適用した安定化装置を用いたシステムで、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーとディーゼル発電とのバランス運転を実現した。これらのシステムは、CO₂ 削減と発電コストの低減を図るマイクログリッドの実証設備である⁽²⁾。実証した技術は、電力の貯蔵設備を持つことで地域内の再生可能エネルギーによる出力変動や需要の変化を吸収し、既存の電力に影響を与えないシステムにやさしいシステムとして普及が期待されている。同時に、この技術はメガソーラーにおける系統連系技術にも活用できる。

7 あとがき

メガソーラーは、地球温暖化防止と地球環境の保護に貢献する発電システムであり、当面は「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」により普及していくと思われる。これまで蓄えてきた配電系統制御技術やマイクログリッド技術を生かして、系統への影響を考慮した大規模太陽光発電に取り組むとともに、今後も最新技術を開発し適用することで、市場ニーズにマッチしたシステムを提供していく所存である。

参考文献

- (1) 藤井幹介ほか. メガソーラー向け屋外設置型高効率PCS「PVH1000」. 富士時報. 2012, vol.85, no.3, p.245-249.
- (2) 小島武彦, 福屋善文. 離島向けマイクログリッドシステム. 富士時報. 2011, vol.84, no.3, p.188-193.



中川 雅之

太陽光発電システムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部エネルギー流通事業部太陽光発電システムプロジェクト部長。



項 東輝

エネルギー管理システムの企画・開発・技術取りまとめに従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部エネルギー流通事業部エネルギーマネジメント技術部担当課長。工学博士。計測自動制御学会会員，電気学会会員，IT コーディネータ。



風力発電用のパワーコンディショナおよびコンバータにおける回路・制御技術

The Circuit and Control Technology in the Power Conditioner and Converter for Wind Turbine Systems

梅沢 一喜 UMEZAWA Kazuyoshi

上原 深志 UEHARA Fukashi

山田 歳也 YAMADA Toshiya

風力発電は、風速の変動による発電変動があるため系統電圧に影響を与える。風力発電を大量に導入するために、系統における電源品質が要求されている。発電変動を補償するものとして、電力安定化用パワーコンディショナ（PCS）がある。これに AT-NPC 3 レベル変換回路を使用して IGBT 素子のスイッチング損失を大幅に低減するとともに、高調波成分の半減により業界最高効率 98.1% を達成した。また、落雷などの系統電圧低下時においても解列しないで運転継続を行う FRT（Fault Ride Through）機能を組み込み、系統連系が可能な電源品質を実現した。

Because the generating power of wind turbines fluctuates according to changes in wind speed, this affects system voltage. To enable large-scale implementation of wind turbines, power system supply quality is demanded. Power conditioning subsystems are available for stabilizing power as a means to compensate for fluctuations in power supply. Using an AT-NPC 3-level conversion circuit, we have greatly reduced switching loss in IGBT devices and also, by halving harmonic components, we have reached 98.1% efficiency, the highest in the industry. Moreover, we have achieved power supply quality sufficient for grid connection by incorporating a fault ride through function so that the system continues to operate without disconnecting even if there is a drop in system voltage due to lightning strike or other causes.

1 まえがき

2012年7月から始まった「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」によって、再生可能エネルギーの導入が加速されようとしている。これまで風力発電は、陸上風力が主体であったが、発電効率を向上するための大容量化や、設置場所の選定に制約が少なく、かつ風況が安定していることから洋上風力発電の開発が加速している。今後の風力発電の大量導入に際して、電力品質向上は必須となってきている。そこで、風力発電の発電変動を緩和し、電力品質に貢献するパワーコンディショナ（PCS）および風力発電用のコンバータにおける回路技術と制御技術について述べる。

このシステムは、同期発電機に接続した AC/DC コンバータで風力発電機の出力を直流に変換し、さらに DC/AC コンバータで交流に変換して系統に連系し、電力を供給する方式である。風力発電では電力は風速の3乗に比例するので、わずかな風速変動が大きな電力変動となる。今後、風力発電の導入量が増加した場合には、電力系統の電圧変動や周波数変動を誘発し、電力品質の低下を招く懸念が指摘されている。これを補償するものとして、電力安定化用 PCS がある。電力貯蔵部には、鉛蓄電池やリチウムイオン電池などを用途に応じて選定する。DC/AC コンバータで電力貯蔵部の充電・放電を制御して、風力発電による電力変動を安定化させている。

2 電力安定化用 PCS

2.1 蓄電池併設型風力発電システムの構成

蓄電池併設型風力発電システムの基本構成を図1に示す。

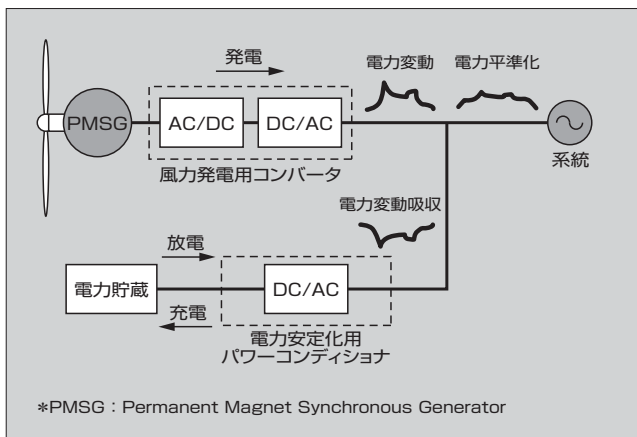


図1 蓄電池併設型風力発電システムの基本構成

2.2 電力安定化用 PCS 「PVI750-3/500」

電力安定化用 PCS 「PVI750-3/500」の外観を図2に示す。



図2 「PVI750-3/500」

(1) システム構成

PVI750-3/500は、2台の250kWインバータから構成される(図3)。蓄電池モジュールの交換・メンテナンスを個別にできるようにするため、二つの直流入力ブレーカの二次側を一つの直流リンクに接続している。起動時は、各インバータが系統と同期した電圧を出力した状態でコンタクトをオンして系統に連系するため、系統への突流を発生することなく起動を完了できる。

インバータのパワーユニットは、AT-NPC (Advanced T-type Neutral-Point-Clamped) 3レベルIGBTモジュール、ヒューズおよびLCLフィルタで構成している(図4)。3レベル回路は1980年代に既に提案されていたが、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子の耐圧を上げることができないため普及していなかった。しかし、素子の直列が不要なインバータにおいては、出力電流の素子通過数を低減できるので導通損失を低減できるというメリットがある。

富士電機は、逆耐圧が必要となる直流中間と交流出力を接続するスイッチに、RB-IGBT (Reverse-Blocking IGBT)を適用したAT-NPC 3レベルIGBTモジュールを実用化した。これにより、従来の2レベルインバータと同じモジュール数で3レベルインバータを構成し、回路を複雑化することなく、高効率なインバータを実現した。

(2) 仕様

表1に、PVI750-3/500の仕様を示す。直流電圧範囲は、低圧での工事が可能なDC750Vに対応し、PCSが出力する交流電圧は200Vとなっている。また、効率カーブ

表1 「PVI750-3/500」の仕様

項目	仕様
容量	500kVA
直流電圧範囲	310~750V
最大入力電流	1,600A
交流電圧	200V (-10~+10%)
周波数	50/60Hz
力率	0.99
高調波ひずみ率	5%以下
最高効率*	98.10%
欧州効率*	97.80%
内部電源容量最大値	900W
待機損失	130W

*IEC-61683効率裕度表示、内部電源含まず

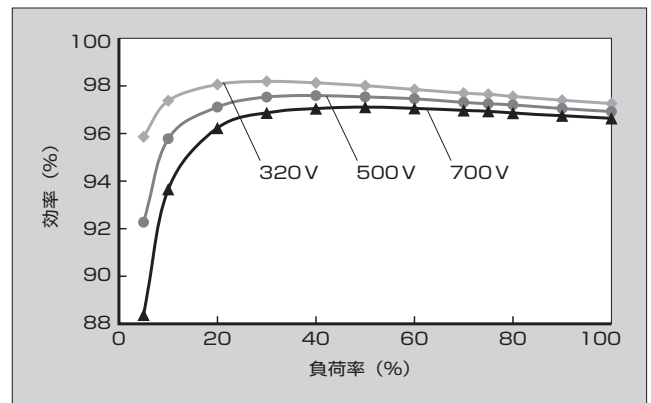


図5 効率カーブ

を図5に示す。AT-NPC 3レベルIGBTモジュールを適用した変換回路により、パワーユニットのスイッチング損失を大幅に低減した。さらに、インバータが出力するPWM (Pulse Width Modulation) 波形に含まれる高調波成分を従来品に比べて半減させたことによって、フィルタ損失が低減し、業界最高効率98.1% (IEC-61683 効率裕度、内部電源含まず) を達成した。

(3) 特性 (FRT性能とインバータ制御方式)

PVI750-3/500には、新エネルギー用電源に必須の機能となりつつあるFRT (Fault Ride Through) 機能を標準で搭載した。FRT機能は、系統での三相短絡や二相短絡の事故においても、インバータは規定範囲内 (各国において要求される瞬低の時間と電圧低下範囲) で三相電流を出力し、系統の電源変動を抑制させるように動作して運転を継続するものである。このFRT機能は、欧州および米国では義務化され、日本においても2013年度以降に導入する機器に義務化されている。また、FRT機能として要求される残存電圧と継続時間は、国ごとで異なっている。そこで、残存電圧0%でも運転継続を可能とするため、制御電源は、外部供給または系統からの自己供給を選択できるようにした。1秒以内の瞬断は内部のコンデンサでバックアップし、1秒を超えるFRTの継続時間の場合はオプション対応とすることで、コストと要求仕様の両立を実現した。

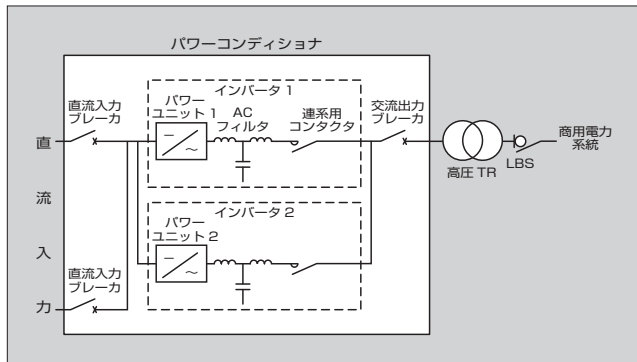


図3 「PVI750-3/500」のシステム構成

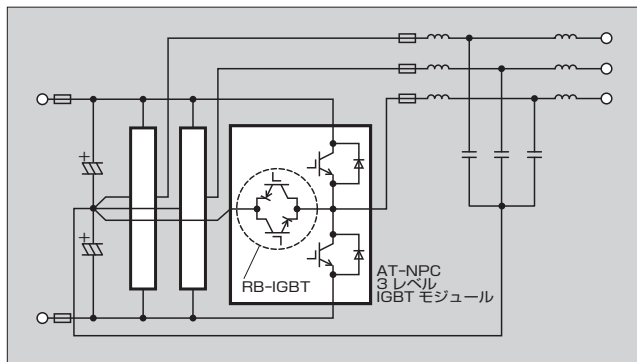


図4 パワーユニットおよびフィルタ回路

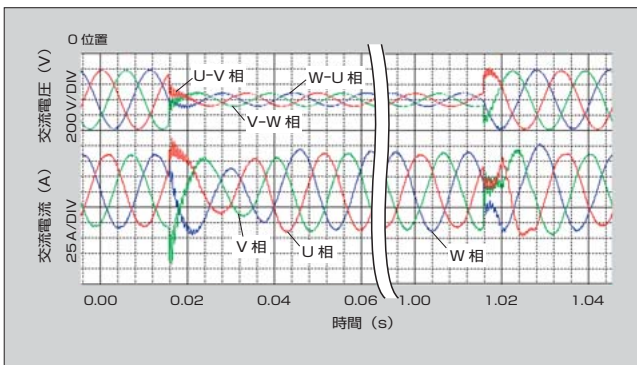


図6 FRT機能の動作検証波形

FRT機能の動作検証を制御検証機(10kW)で行った。残存電圧0%では常時ゲートロック状態とし、0A制御を行うことによって運転を継続させる。残存電圧20%時は、図6に示すように、瞬低発生から6ms後には断続的なゲートロックが発生しなくなり、約2サイクル後には定格電流を出力できていることを確認した。このように、瞬低発生時にPCSは運転を継続できることを確認した。

3 風力発電用コンバータ

図7に、風力発電機が多巻きの場合の構成を示す。1,500kVAのコンバータ盤が2台、並列に接続されている。

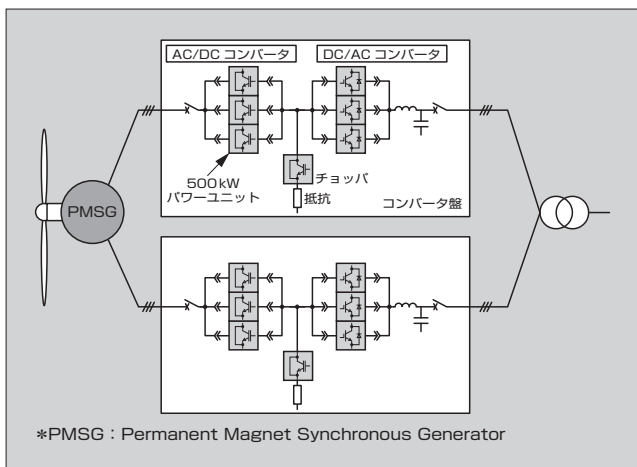


図7 風力発電装置(同期発電機)

表2 風力発電用コンバータの仕様

項目	仕様
容量	1,500kVA×2 (3,000kVA)
定格有効電力	1,350kW
定格無効電力	650kVar
定格電圧	690V
定格電流	1,255A
周波数	50/60Hz
力率	0.99
高調波歪率	5%以下
最高効率	97.20%

コンバータ盤は、500kVAの水冷パワーユニットとして3並列のDC/ACコンバータ、チョッパおよびエネルギー消費用抵抗で構成される。このチョッパは、系統異常時などに直流中間電圧が上昇しないようにDC/ACコンバータを制御するためのものである。水冷パワーユニットはプラグイン構造で3並列、コンバータ盤は2並列のため、保守性が向上し、故障時には健全部での運転が可能であり、稼働率を向上させている。表2に風力発電用コンバータの仕様を示す。

3.1 水冷パワーユニット

富士電機製のIGBT「6MBI450V-170-50」を使用した水冷パワーユニットは、水冷ヒートシンク、直流中間用フィルムコンデンサ、ラジエータファン、ゲートドライブ、保護監視回路などから構成されている。このパワーユニットは、プラグイン構造を採用することにより、メンテナンス性を向上させており、かつ故障したパワーユニットを間引きして運転することができる。これを実現するために、パワーユニットをプラグインした前後でインピーダンスが一定になるように、ラミネートブスバーと共通モードコアを組み合わせた。これにより、各パワーユニット間の電流の釣り合いが取れて、横流が5%以下になった。そのため、必要に応じて、どの位置のパワーユニットを外しても運転を継続することが可能になった。図8に、水冷パワーユニットとコンバータ盤の外観を示す。

制御装置とパワーユニット間は光ファイバーで接続され、制御装置からのゲート信号、パワーユニットからの故障情報を通信している。また、自己監視機能としてアーム短絡保護、素子温度異常、ユニット内温度異常、過電流保護、ゲート電圧異常、クロック異常を検出し、異常判定保護と同時に情報を制御装置に送信する。

3.2 ラジエータによる盤内気流循環冷却

風力発電に適用するコンバータ盤は、洋上などの環境に

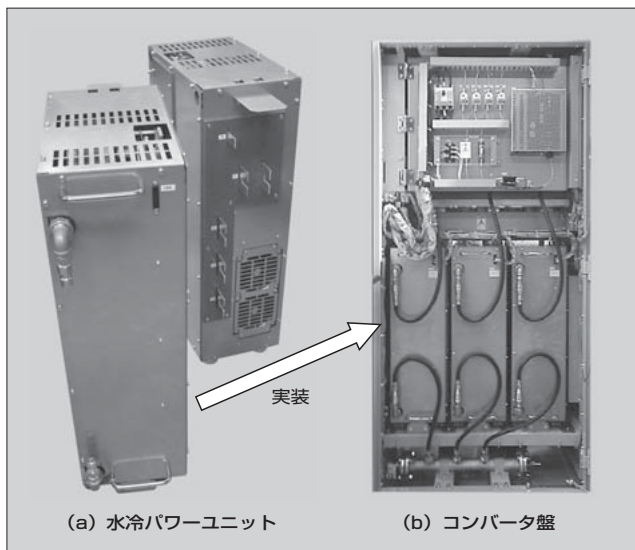


図8 水冷パワーユニット(500kVA)

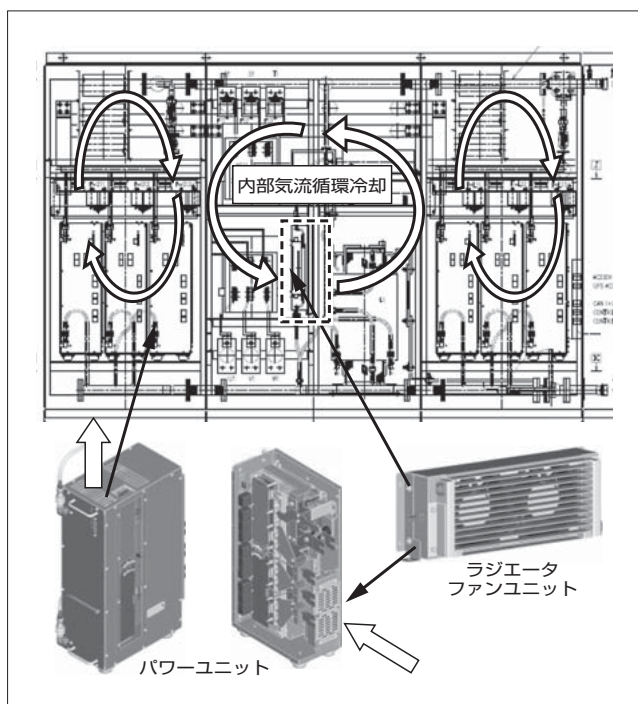


図9 ラジエータによる内部気流循環冷却

耐えるように^{〈注1〉}IP54に適合させ、盤は外気を取り込まず気密を保つ構造となっている。そのため、冷却は図9に示すように、ラジエータファンユニットをパワーユニットに実装し、かつフィルタ用リアクトルの近傍に配備して、ファンによる強制気流循環で盤内を冷却している。

3.3 システム並列

今後の風力発電容量の増加に伴い、予想される電力影響度の増大を抑えることおよび稼働率向上の要求がある。図7のように、二つのコンバータ盤が発電機に対して並列に運転することで、どちらかが故障停止しても健全なコンバータからトルク低減要請指令を送信する。これにより、風力発電機ブレードのピッチ制御で容量を低減させた運転を行うことで、健全なコンバータの許容量内での運転継続可能なシステムを実現できる。

3.4 系統電圧安定制御

風力発電の電力の変動によって系統電圧の変動が発生する。この対策のために、次の2種類の無効電力制御機能を装備して補償性能の向上を図っている。

(a) 力率一定指令による無効電力制御

あらかじめ設定された力率になるように無効電力を供給することで、系統電圧への影響を制限させる場合に適用する。特に、電力系統の電圧や力率を制御するシステムコントローラは不要である。

(b) システムコントローラからの指令による制御

システムコントローラから、各風力発電装置に指令を送信する。系統連系点の電圧を確実に制御する場合に適用する。

これにより、SVC (Static Var Compensator) などの設

備を用意しなくても系統電圧を許容範囲内に制御できる。

3.5 FRT 機能

系統連系システムにおいて、太陽光発電や風力発電などの発電容量が増加して重要度が増した場合、落雷や系統事故^{〈注2〉}によって系統電圧が低下してこれらが一齐に解列してしまうと、系統の電力が不足し停電に陥る危険性が高まる。これを回避するための機能が2.2節で述べたPCSと同様のFRT機能であり、系統擾乱(じょうらん)においても運転を継続することができる。

系統事故には三相短絡や二相短絡などさまざまな現象がある。この時、系統三相電圧の不平衡や位相跳躍が発生する。この現象に対して過負荷トリップを行うことなくコンバータを制御できることが重要である。系統のいかなる変化にも高速に追従し、安定した運転を継続するための技術には次の三つがある。

- (a) 系統電圧が低下して発電電力を系統に出力できなくなった場合、装置内のチョッパと抵抗で電力を消費する。
- (b) 系統電圧の急変に追従するために、コンバータの系統電圧検出処理でバンドパスフィルタと位相を調整した正弦波とからコンバータの基本電圧指令を作成し、波形応答性を向上させる。
- (c) 系統残電圧0%からの起動時において、波形ひずみを低減し、安定した制御を行うために、系統電圧から生成した第3高調波波形と制御装置内部にあるPWMキャリアに同期した第3高調波テーブルデータを同期制御する(図10)。

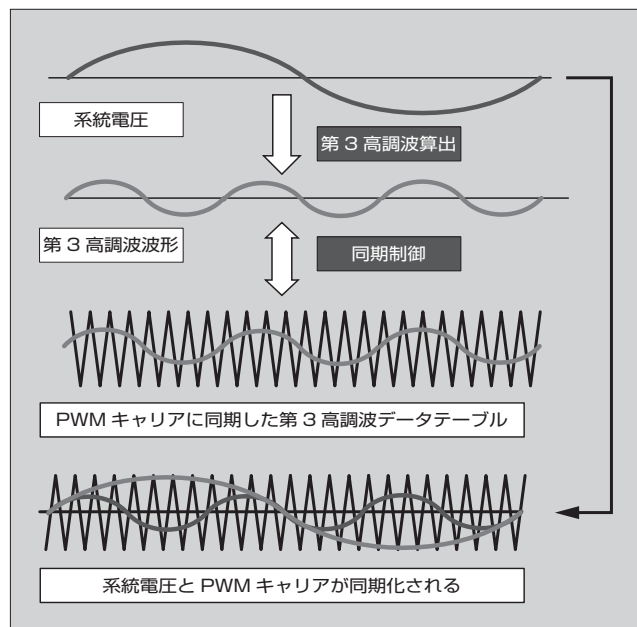


図10 系統電圧とPWMキャリアの同期

〈注1〉 IP54: IEC60529 で定めた防塵性能・防水性能に関する保護等級

〈注2〉 解列: 電力系統から発電設備などを切り離すこと

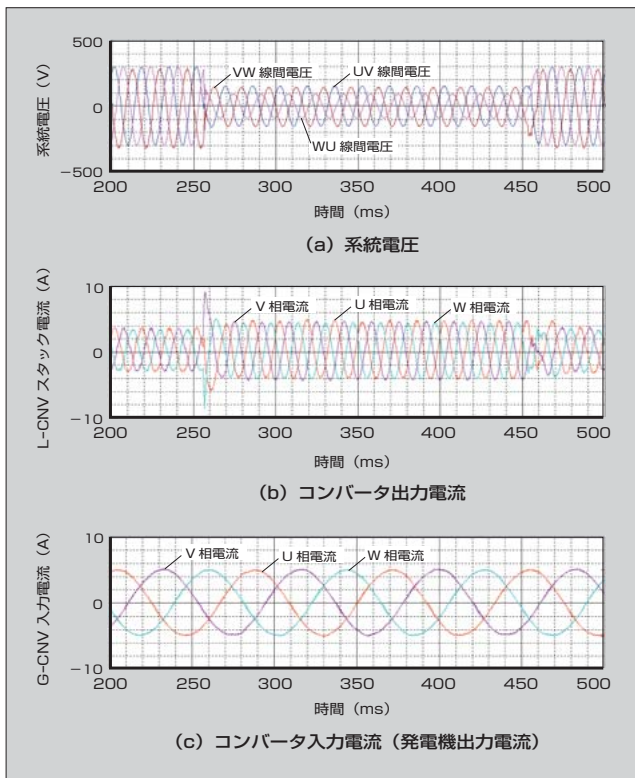


図 11 制御検証機によるFRT 動作特性

これらにより、PWM キャリアを基本波に 0.1 秒程度で同期させることが可能になった。図 11 に、制御検証用試験機 (3kW) で実施した FRT 動作特性を示す。系統異常時に出力電流、入力電流ともに安定した運転を実現した。

4 あとがき

風力発電用のパワーコンディショナおよびコンバータにおける回路・制御技術について述べた。今後、風力発電システムの大量導入に向けて、よりいっそうの技術開発を進め、耐環境性、電力高品質、高効率化、運転継続による稼働率向上、電源擾乱抑制などに向けた制御技術および電力変換回路技術を実現させていく所存である。

参考文献

- (1) Nakazawa, H. et al. "Hybrid isolation process with deep diffusion and V-groove for reverse blocking IGBTs". ISPSD, 2011.
- (2) Yatsu, M. et al. "A Study of High Efficiency UPS Using Advanced Three-level Topology". PCIM Europe Conference, 2010.



梅沢 一喜

無停電電源装置、PCS、風力発電用コンバータの開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター製品技術開発部マネージャー。電気学会会員。



上原 深志

産業用可変速装置、風力発電用コンバータの開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター製品技術開発部課長補佐。



山田 歳也

無停電電源装置、PCSの開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター製品技術開発部。



風力発電用永久磁石同期発電機

Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind-Power Generation

真下 明秀 MASHIMO Akihide

星 昌博 HOSHI Masahiro

梅田 望緒 UMEMA Mio

再生可能エネルギーへの注目が集まる中、風力発電分野においても世界的に市場が伸長している。富士電機では、風力発電の高効率運用を目指した風力発電装置の製品化を進めている。発電機には永久磁石同期発電機を採用しており、国内最大級の3,000 kW級試作機の製作、検証を完了した。ダイレクト駆動方式の風力発電システムに適用する低速の発電機である。軽量化、耐環境性および多台数生産に適した構造を実現するための新しい技術を盛り込んでいる。試作機の検証結果は良好であり、風力発電機としての性能を十分に満たしていることを確認した。

Amid the attention on renewable energy, the market for wind-power generation is expanding on a global scale. At Fuji Electric, we are pushing forward the commercialization of wind-power generation equipment with the aim of achieving highly efficient operation of wind-power plants. We recently completed production and testing of a prototype 3,000 kW permanent magnet synchronous generator, which is the largest class in Japan. This is a low-speed generator for use in direct drive wind-power generation systems. The device incorporates new technology to achieve a suitable structure for weight-reduction, environmental resistance and multi-unit production.

We have obtained favorable prototype test results, and verified that the device sufficiently meets the functional requirements for a wind-power generator.

1 まえがき

再生可能エネルギーへの注目が集まる中、富士電機では高効率運用が可能な風力発電装置の製品化を進めている。発電機には永久磁石同期発電機を採用しており、このたび国内最大級の3,000 kW級発電機の試作、検証を完了した。本発電機は、ダイレクト駆動方式の風力発電システムに適用する低速の発電機であり、開発に当たっては各種の解析技術を駆使して新しい技術を盛り込んでいる。検証結果は設計通りで、風力発電機としての性能を十分満たすことを確認している。本稿では、開発した風力用永久磁石同期発電機の主要技術について述べる。

2 開発の方針と適用システム

図1に、巻線形誘導発電機によるダブルフェド方式および永久磁石同期発電機によるダイレクト駆動方式のシステム概要を示す。

増速ギヤを用いる発電システムでは巻線形誘導発電機が主流であり、かご形誘導発電機を用いる方法もある。巻線形誘導発電機を用いるものはダブルフェド方式と呼ばれ、励磁容量分の電力変換器を用いて回転子側電流周波数をコントロールすることで、風車の回転数が変わっても一定周波数の発電が可能なシステムである(図1(a))。この方式の発電システムは発電機を小型化することができるという利点がある半面、増速ギヤのトラブルやメンテナンスが多いという欠点がある。

一方、ダイレクト駆動方式の発電システムは発電機が大型化する反面、増速ギヤを必要としないためトラブルやメンテナンスを減らすことができ、さらに騒音が小さいという利点がある(図1(b))。発電機には、永久磁石同期発電

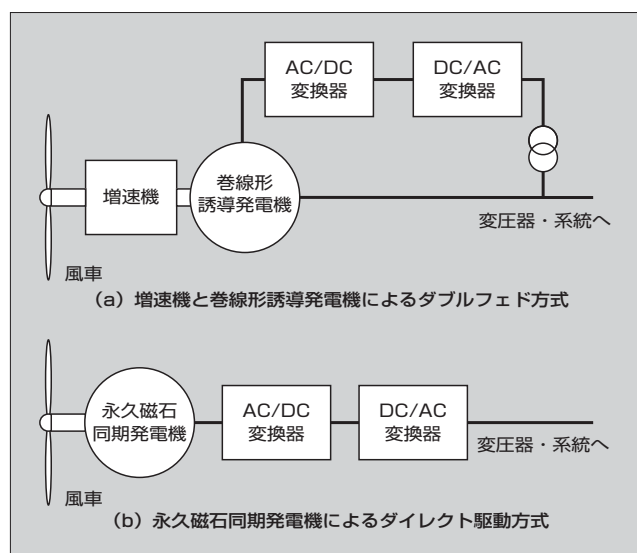


図1 風力発電システムの概要

機や通常の同期発電機を用いる場合がほとんどである。風車の回転数の変動に応じて発電機の出力電力の周波数変動するので、発電容量分の電力変換器(フルコンバータ)が必要となる。一方、フルコンバータを介して電力を供給するため、広い風速の範囲への対応が可能であり、特に低風速領域での発電効率が向上する⁽²⁾など運用面での利点が多い。風力発電機は一つの発電サイトに多くの台数が設置されることが多い。そのため大型の発電機を効率良く生産できるように、今回の開発では生産性も考慮した構造を採用している。風力発電機に適した性能を得るために、次に示す方針で開発を進めた。

- (a) 多台数生産に適した構造の採用
- (b) 陸上輸送を考慮した外形寸法の縮小と軽量化
- (c) 耐環境性を考慮した絶縁構造

3 試作機の仕様と構造

3.1 試作機の仕様

試作機の外観を図2に、仕様を表1に示す。出力は国内最大級の3,000kW級とし、回転数はこのクラスの風車の一般的な回転速度を想定して 15 min^{-1} とした。また、工場内で試験が行えるように回転軸構造を採用し、駆動機に直結できる構造とした。なお、実際の風車との結合を想定した構造で周辺構造の基本設計を行い、そこから試作機の構造へ落とし込みを行っている。冷却は外皮および機内の空冷としており、外皮にはフィンを装着し、風車に直結して屋外に配置することを想定した。なお、試作機の全体質量は大幅な軽量化の結果75tで仕上がった。一般に回転電気機械の大きさは、そのトルクの大きさに比例するが、トルク当たりの質量としては水車発電機と比較して一桁少ない数値である。

3.2 試作機の構造

開発方針に沿って軽量化および生産性の向上を図り、次に示す特徴的な構造を採用した。

(1) 固定子の構造

固定子の外形は直径4mを超えるため、次工程に進むまでの間、広いスペースに大きな部品が居座ることとなり、生産効率が悪くなる懸念があった。これを解消するために、固定子は分割鉄心とし、鉄心と巻線は分割した単位ごとに組み立てを進め、最後に分割鉄心を固定子枠（フレーム）

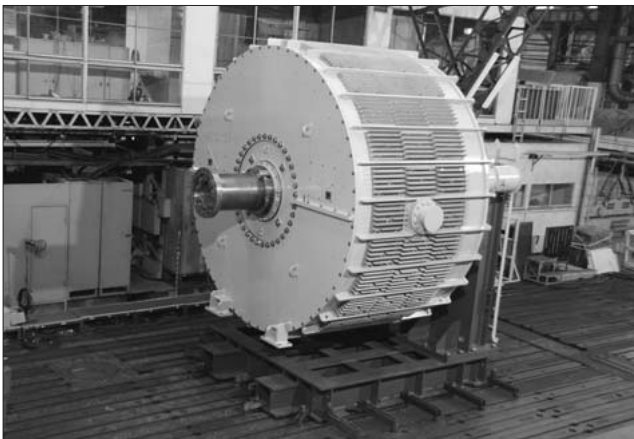


図2 風力発電用3,000kW永久磁石同期発電機試作機

表1 風力発電用3,000kW永久磁石同期発電機試作機の仕様

項目	仕様
出力	3,000kW
回転数	15 min^{-1}
電圧	690V
効率	94.7%
冷却方式	外皮+機内空冷
温度上昇	Fクラス (IEC60034-1)

の内径に装着して円筒状の固定子に組み立てる製作方法を採用した。分割鉄心構造は、水車発電機など大口径の発電機では一般的に採用される方式である。巻線の幅（ピッチ）が広く、異なる分割鉄心に巻線がまたがるため、一部の巻線の挿入は鉄心を組み立てた後に行う。

試作機では、巻線に次に説明する集中巻き方式を採用することで、全ての巻線を鉄心に組み込んだ状態とし、完全に鉄心の分割単位で扱えるようになっている。図3に、鉄心の分割とコイルの関係を示す。

(2) 巻線の構造

前項で一部触れたが、固定子巻線に採用している集中巻き方式は、サーボモータなどの小型回転機ではよく採用される方式である。通常、素線にはエナメル被覆の丸線を用いることが多い。

本試作機は、大容量機であるので平角銅線を用いて集中巻きを行った。図4に示すように、従来の分布巻きでは巻線のピッチが広く、亀甲巻きとなるため固定子鉄心から突き出ているコイルエンドの部分で余分な損失（銅損）が発生している。一方、集中巻きではコイルエンドの寸法を短

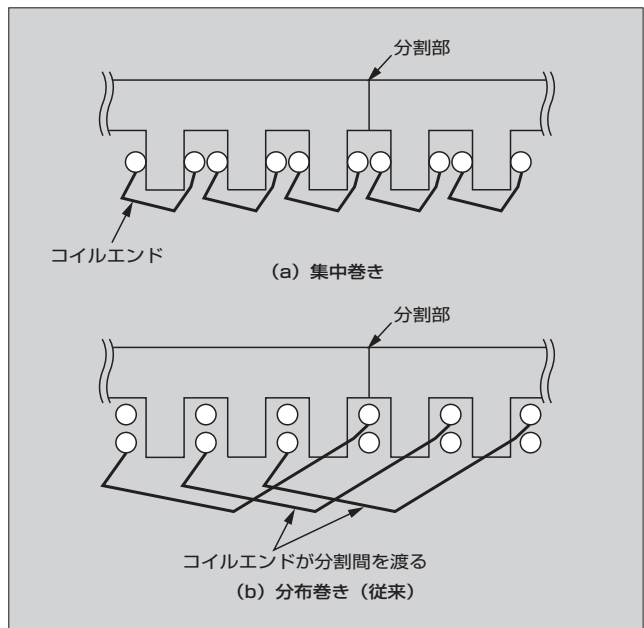


図3 鉄心の分割とコイルの関係

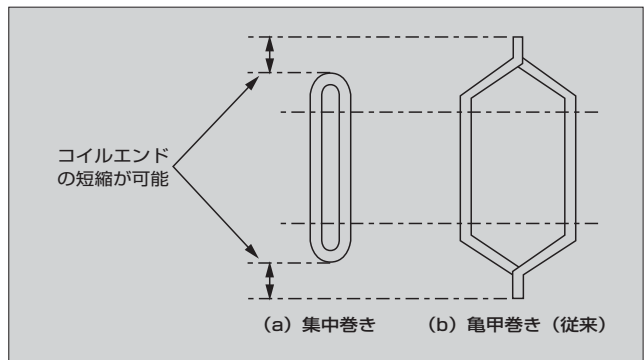


図4 巻線の比較

かくできるため、発電機全長の短縮およびコイルエンドで発生する銅損が低減できる。分布巻きに対して、固定子鉄心の長さを同一にした場合、全長を 150 mm 程度短縮する効果があり、損失は約 6% 低減できるという試算結果が得られている。

(3) 回転子の構造

回転子の構造は、回転子の表面に永久磁石を取り付けた、いわゆる SPM (Surface Permanent Magnet) 構造である。永久磁石には、エネルギー積の高いネオジウム-鉄-ボロン系の焼結磁石を用いている。着磁後に回転子に装着する際に、大きな吸引力によって作業性が著しく低下する。これを改善するために、鉄製の磁極座に無着磁の磁石を複数個取り付けて一つの磁極を組み立てて構成し、その磁極単位で着磁を行った後に回転子に装着する方法を採用した。この方法を用いると、着磁後の磁束は、磁石表面から空中に出たのち磁性材料である磁極座を介して反対側の面に渡る回路を通る。このため、着磁された磁石を直接回転子に装着するよりも回転子に回る磁束量が減少して吸引力が低減し、結果として作業性が向上する。図 5 に示すように万が一磁石が割れても飛散しないように、磁極の外皮をステンレス鋼板のカバーで覆っている。この磁極を回転子の軸方向に複数連ねて発電機の 1 極分を構成している。

また、永久磁石機で発生する特徴的なトルク脈動として、磁石と鉄心の間で起こるコギングトルクがある。その対策として 1 極中の各磁極を所定の角度にずらして配置 (スキュー) することでコギングトルクを低減させた。電磁界解析により、コギングトルクは定格トルクに比べて十分低く問題のないことを確認している。

(4) 軽量化のための構造検討

発電機を軽量化するため、有限要素法による構造設計を行って各部の形状を決定した。解析の一例として、風車の荷重に対する回転子の変形の解析結果を図 6 に示す。

解析に用いた形状は、風車への設置状態を踏まえて固定軸を前提とした構造であり、試作機とは構造が異なる。回転子の表面には磁石が存在するため、固定子との間 (ギャップ) には吸引力が常に作用している。ギャップの



図 5 回転子磁極 (カバー装着状態)

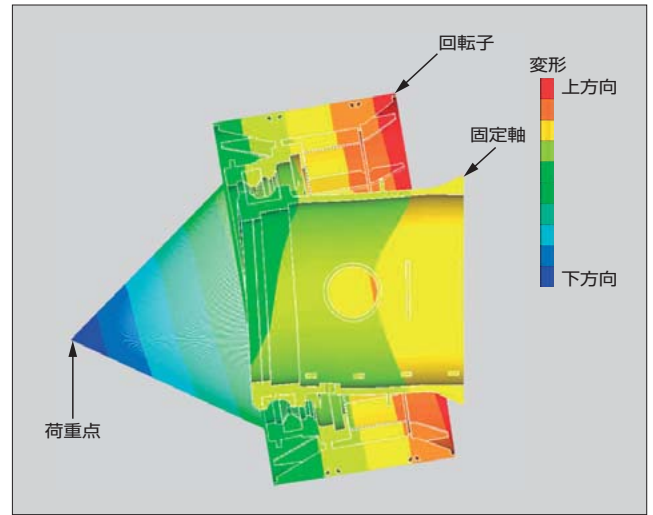


図 6 固定軸モデルによる回転子の変形解析の結果

変動があると吸引力も変化するため、変形による吸引力の変化を考慮した解析を行っている。これらの解析結果を用いて軽量化に向けた構造の最適化を行った。

3.3 通風・冷却構造

冷却性能の向上は小型化に大きく寄与するため、試作機の冷却方法も工夫している。

ダイレクト駆動の発電機は、ハブとの間にギヤユニットが存在しないので、ナセル内に設置する必要がない。このため風車を通過した風を、発電機の外皮を冷やす冷却風として利用できる。しかし、外皮冷却の場合、主発熱部である巻線から放熱部である外皮までの間にある鉄心や構造部材によって熱抵抗が高くなるため、コイル近傍で冷却する内気循環空冷に比べると冷却性能がやや劣る。このため試作機では、外皮空冷をメインとしながら発電機の内部への通風も同時に行うハイブリッド冷却とすることで、冷却性能の向上を図った。冷却構造を図 7 に示す。

外皮にはフィンを設け、発電機内部の空気は空隙部と鉄

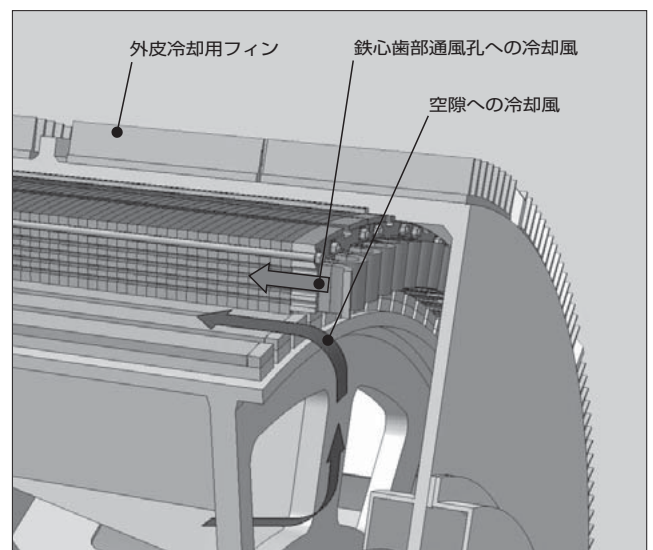


図 7 冷却風の流路

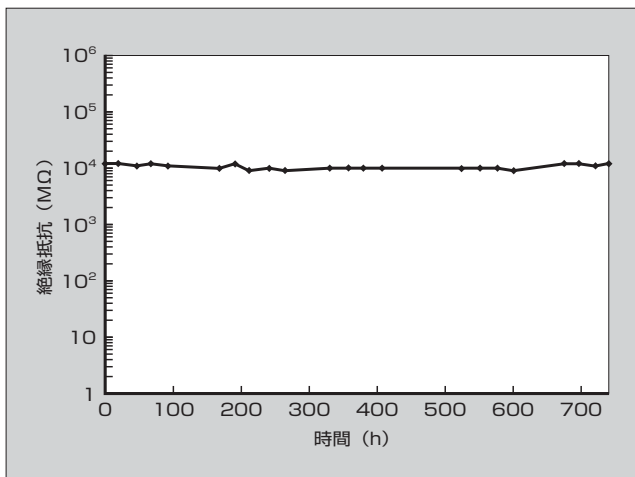


図8 絶縁抵抗—時間特性（水没試験結果）

心内に設けた通風孔を通す流路とした。冷却効果は熱流体解析を用いて設計段階で確認したとおり、一般的な外皮空冷方式の回転機に対して1.5～2倍に近いトルク密度（体積当たりのトルク）が得られている。

3.4 絶縁性能

本試作機の定格電圧は690Vであるが、PWM（Pulse Width Modulation）制御の電力変換器を介して系統に接続するため、電力変換器の直流中間電圧とパルス給電により発生するサージ電圧を考慮して、より高い電圧に対する絶縁仕様とする必要がある。直流中間電圧は1,150Vとなり、これにサージ電圧も考慮すると最大で2倍の電圧になるため、2,300Vの絶縁耐圧が必要になる。

風力発電機は、設置場所が地上から離れた高所にあるため故障が生じても修理することが容易でないため、信頼性の高い絶縁システムが必要である。また、海岸近傍や森林付近など結露が生じやすい環境に設置されることも多く、耐湿性の高いシステムが求められる。

耐環境性絶縁として、これまで実績のある全含浸絶縁を採用した。この絶縁の耐水性を確認するために水没試験による検証を実施した。水没試験には固定子を分割した鉄心付きモデルを使用し、コイルを複数個接続して、相間の渡り配線絶縁も模擬できる構造となっている。試験の結果、図8に示すように、1か月にわたり水没させても絶縁抵抗の低下は生じなかった。

4 試作機の試験結果

試作機について、発電機単体試験および電力変換器との組合せ試験を実施した。図9に組合せ試験状況を示す。

試験結果は、単体試験も組合せ試験もそれぞれ良好であり、設計通りの性能が得られていることを確認した。特に、大型発電機として初めて採用した集中巻き巻線と分割鉄心構造による固定子の絶縁性能は、耐電圧試験の2,380V（定格電圧690V×2+1,000V）に余裕を持って耐え、絶縁性能に関して問題のないことを確認した。

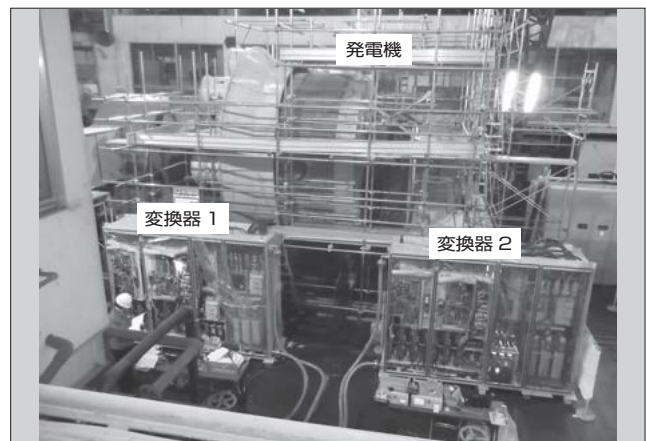


図9 組合せ試験状況

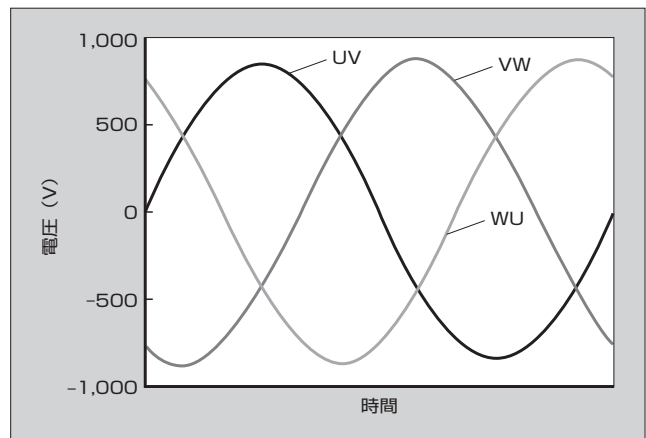


図10 無負荷誘起電圧

温度上昇試験の結果、巻線の温度上昇は十分に規格値内に収まった。また、騒音測定の結果は80dB以下の目標仕様を満たしており、低速発電機ゆへの低騒音化を確認することができた。図10に無負荷誘起電圧の波形を示す。振動の要因となるひずみの少ない波形が得られた。

5 あとがき

このたび開発した風力用永久磁石同期発電機は、2013年度に量産機の市場供給を計画している。現在は、これに向けて量産化のための各種検討を進めている。

風力発電分野は今後の市場拡大が期待されており、現在発電機の洋上設置に向けた検討が国内各所で行われている。陸上よりも設置費用が掛かる洋上発電においては、発電単価を低減するために発電機の大容量化が求められている。今後、さらなる大容量発電機の開発に力を入れていく所存である。

参考文献

- (1) 真下明秀ほか. 回転機の最新技術. 富士時報. 2010, vol.83, no.3, p.207-211.
- (2) 木村守. 大容量風力発電用発電機の特長比較. 電気学会誌. 2009, vol.129, no.5, p.288-290.



真下 明秀

回転機の開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所回転機技術開発部主任。電気学会会員。



梅田 望緒

大型回転機の開発，設計に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場回転機部。



星 昌博

大型回転機の開発，設計に従事。現在，富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所回転機技術開発部主任。



新規ニーズに対応した燃料電池

Development of Fuel Cells Adapted to Meet New Needs

腰 一昭 KOSHI Kazuaki

黒田 健一 KURODA Kenichi

堀内 義実 HORIUCHI Yoshimi

東日本大震災以降、高効率な分散型電源である 100 kW 燃料電池の導入による電源セキュリティの向上や、再生可能エネルギーである下水消化ガス発電への燃料電池の適用が広く検討されてきている。

富士電機は、停電時の自立運転への切替え技術や LP ガスへの燃料の切替え技術などを適用して、電源セキュリティを向上した燃料電池を開発し、川崎工場に設置した。また、小規模下水処理場向けの下水消化ガスと都市ガスが併用可能な機種や、EU 向けの CE マーク適合機種など、新規ニーズに対応した燃料電池を開発している。

Since the Great East Japan Earthquake, there has been broad investigation into the improvement of the quality of power-source security through introduction of 100 kW fuel cells, which are a highly efficient form of distributable power, and into the use of fuel cells for sewage digester gas power generation, which is a form of renewable energy.

Utilizing technology for switching to independent power during power outages and technology for converting to LP gas, Fuji Electric has developed fuel cells with improved power security and installed them in the Kawasaki Factory. Fuji Electric is also developing fuel cells adapted to meet new needs, such as fuel cells that can operate on both sewage digester gas and utility gas for small-scale sewage treatment plants and fuel cells that meets CE marking requirements for the EU.

1 まえがき

2011 年 3 月の東日本大震災以降、電源セキュリティの向上や分散型電源に対する期待が高まっている。また、2012 年 7 月に始まった「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」により、バイオマス発電の導入が広く検討されるようになってきた。

富士電機では、1998 年に 100 kW 燃料電池の販売を開始し、さまざまなサイトで運転を行ってきた。都市ガスを燃料としたものが多いが、バイオガスである下水消化ガスを燃料とした機種を 2 か所のサイトに合計 6 台納入している。2010 年から最新機種である「FP-100i」を市場に投入

し、さらに、新たな用途として燃料電池の排空気（低酸素空気）を利用した機種を開発し、ドイツに出荷した。

本稿では、新規ニーズに対応した燃料電池として、電源セキュリティ対応機種、小規模下水処理場向け機種および欧州の CE マーク適合機種の開発状況について述べる。

2 電源セキュリティ対応燃料電池

図 1 に、電源セキュリティ対応燃料電池の機能概要を示す。システム事故や災害などにより停電が発生した場合の非常用発電機として、これまで短時間で起動できるディーゼル発電機が主に利用されてきたが、安価な反面、騒音、排ガ

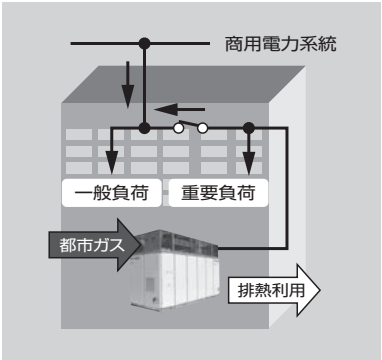
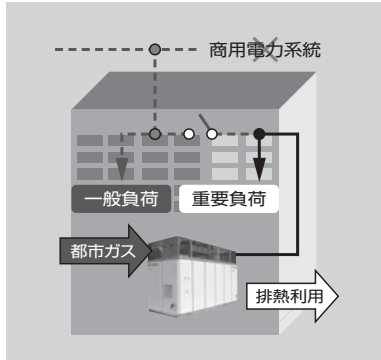
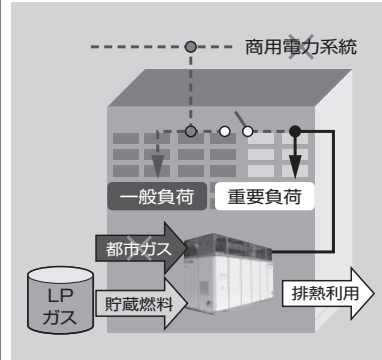
状態区分	通常時	停電時	停電+都市ガス遮断時
概要	高効率、省エネルギーのクリーン発電 発電端（発電電力量）42%	待機状態を経て重要負荷へ給電	待機状態を経て重要負荷へ給電
出力	100 kW	100 kVA	70 kVA
燃料	都市ガス	都市ガス	LPガス (50 kgボンベで3時間)
運転	系統連系運転	自立運転	自立運転
電力供給範囲			

図 1 電源セキュリティ対応燃料電池の機能概要

スの問題、設備稼働率が低いなど欠点もあった。富士電機の100kW燃料電池は、通常はクリーンかつ高効率な地球にやさしいコージェネレーション装置として常用運転を行い、電力系統が停電した場合は、自立運転に切り替わり、重要負荷などに電気を供給することができる。これにより、ディーゼル発電機などの非常用電源からは非常用負荷に、燃料電池からはその他の重要負荷に給電することで、非常時の電源供給の余力を増すことができる。また、都市ガスの供給が停止しても、備蓄LPガスに切り替えて継続して運転することができる。

(1) 系統連系運転から自立運転への切替え

図2に自立運転の切替えの例を示す。系統連系運転状態で停電が発生した場合には、自動的に商用系統から解列し、いったん待機運転モードに移行する。このとき燃料電池は単独で発電を継続し、発電した電力は燃料電池内で消費するので、停電を検知してから約30秒で自立運転を開始することができる。自立運転において過電流・過負荷保護機能とリミッタ機能により、突入電流が発生する回転機類を連続して投入することができる。また、自立運転時に接続負荷が増減してもプロセスの状態を一定に保ったままで、燃



図3 富士電機川崎工場に設置した燃料電池

料電池内の電気ヒータと独立負荷とをステップ状に切り替えることで燃料電池を安定に制御するシステムとしている。

(2) 都市ガスからLPガスへの切替え

都市ガスからLPガスへの切替えは、都市ガスの元圧低下信号を検知すると、都市ガス遮断弁の閉動作およびLPガス遮断弁の開動作により行う。

単位体積当たりのLPガスの発熱量は、都市ガスの発熱量の約2倍であるため、水素を発生する改質条件が異なる。また、発電装置に内蔵したプロセス機器内のガス置換が必要であること、LPガス流量計の立上りに時間遅れが生じることなど、運転中の燃料種別の切替えにはいくつかの難しい要素がある。そこで、シミュレーションから得られた適正なガス流量を維持するためのバルブ動作を組み込むなど、制御を工夫することで待機状態を経由して燃料種別を切り替えられるようにした。なお、LPガスによる運転では、出力は70kVAに制限されるが、50kgボンベで約3時間の給電が可能である。

(3) 工場への設置事例

電源セキュリティ対応燃料電池を富士電機川崎工場に設置し、2012年2月から運転している(図3)。通常時は都市ガスによるコージェネレーションとして、停電時には工場内の重要設備へ給電できるようになっている。排熱は冷暖房とボイラへの給水予熱に利用している。

③ 小規模下水処理場向け燃料電池

下水処理場は、公共水域の水質保全のため、各家庭から出た生活排水などを集め、水の汚れを浄化して川や海に返す施設である。汚水をきれいにする際に取り除いた汚れは下水汚泥と呼ばれる。この下水汚泥を減量化・安定化するため、酸素がない状態で有機物を分解する嫌気性消化処理を行うと、メタンガスを主成分とする下水消化ガスが発生する。

現在、下水汚泥の嫌気性消化処理は国内の下水処理場のうち、約260施設で行われている。総発生量が約2.6億m³/年になる下水消化ガスは、その大部分が汚泥消化槽(消化タンク)の加温や汚泥燃焼の補助燃料に利用されて

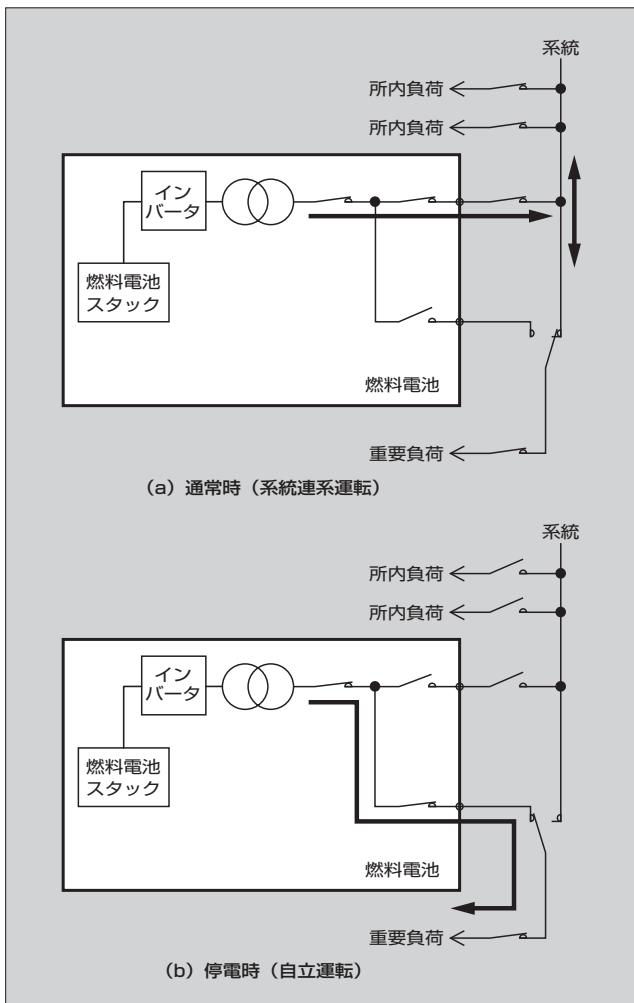


図2 停電時の切替え例

〈注〉 解列：電力系統から発電設備などを切り離すこと

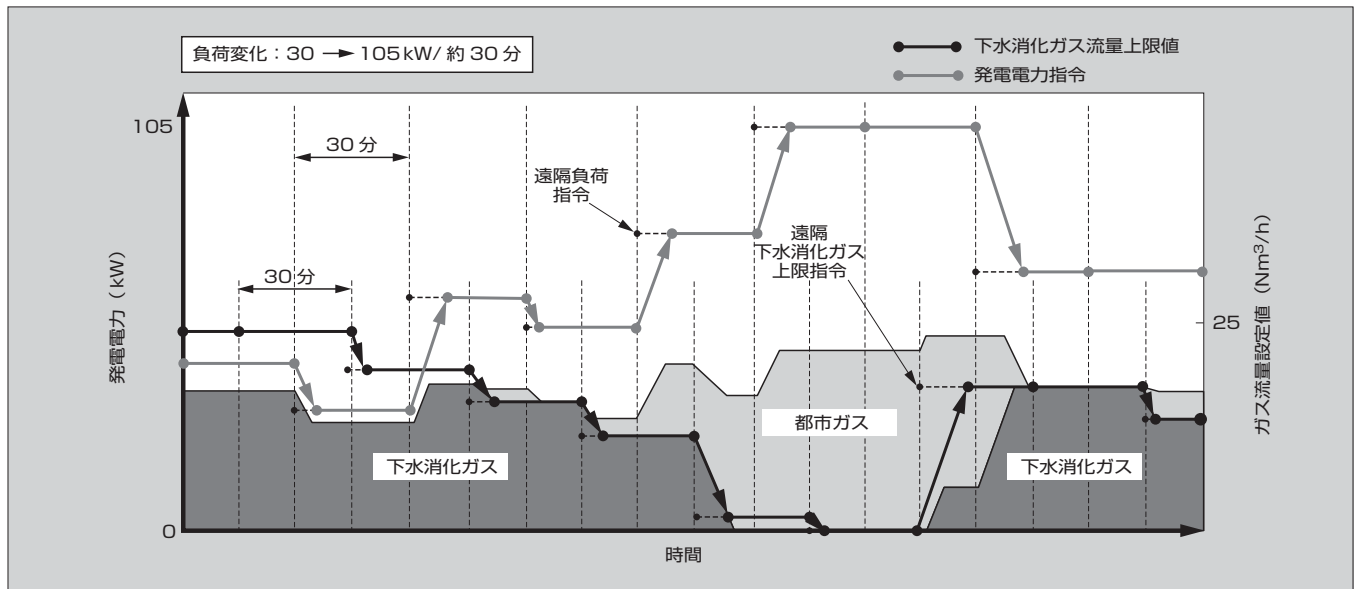


図4 ガス混合運転の概要

いるだけで、消化ガス発電を行っている施設は少数である。しかし、東日本大震災以降、震災時の電源確保や、2012年の再生可能エネルギーの固定価格買取制度の開始により、下水消化ガス発電への期待は大きくなっている。

下水消化ガスの成分は、メタン60%、CO₂40%であり、100kW燃料電池の定格運転には1日1,200m³程度の下水消化ガスの発生が必要である。下水消化ガスを発生させている下水処理場の約半分は、上記の必要発生量以下の小規模なところである。そのような下水処理場でも100kW燃料電池が導入できるように、下水消化ガスの発生量が少なくても都市ガスを併用して発電できる装置を開発した。

下水消化ガスをベースに発電を行い、必要電力量に対して下水消化ガスの量が足りないときに都市ガスを加えることで発電電力量を確保する。図4に、ガス混合運転の概要を示す。

本装置は、国土交通省の「下水道革新的技術実証事業」(B-DASHプロジェクト)の発電装置として大阪市の下水処理場に2012年2月に設置し、2012年4月に実証試験を開始している。B-DASHプロジェクトの超高効率固液分離技術を用いたエネルギーマネジメントシステムに関する実証事業では、“超高効率固液分離”“高効率高温消化”“スマート発電システム”の三つの革新的技術を組み合わせてシステムとして機能させることで、エネルギー自給型下水処理場を目指している。燃料電池は、この中のスマート発電システムの中で下水消化ガスと都市ガスが併用できるハイブリッド型発電機として利用されている。

4 CEマーク適合燃料電池

4.1 各国のコージェネレーションの普及率

図5に、各国のコージェネレーションの普及率を示す。EUおよび米国のコージェネレーション普及率は、日本を上回っている。EUでは、エネルギーの安全保障と気候変

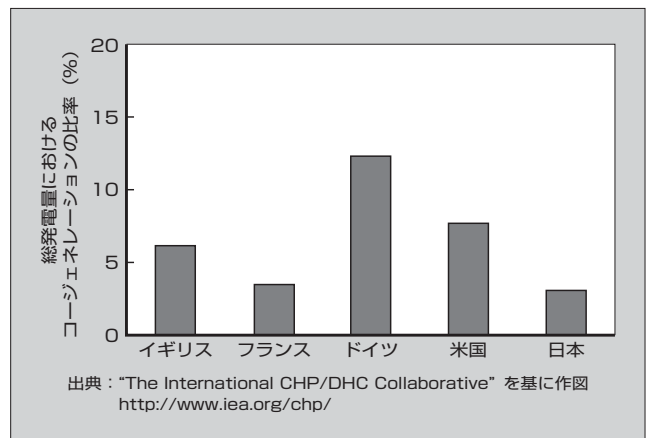


図5 コージェネレーションの普及率(2005年)

動問題の観点から天然ガスの利用拡大を図りつつある。特に、天然ガスコージェネレーションは、省エネルギーに即効性のある数少ない技術の一つとして充実した普及支援策が打ち出されている。普及支援策として、イニシャルコストの支援(コージェネレーションや熱インフラへの補助金、助成、税制優遇)およびランニングコストの支援(電力買取、燃料費への税制優遇)がある。

4.2 ドイツ市場と低酸素濃度空気供給

富士電機は、ドイツN2telligence社をパートナーとして、ドイツ市場への参入を進めてきた。ドイツ市場の特徴として次の二つが挙げられる。

(1) ドイツ政府による手厚い普及支援策

ドイツは原子力発電を廃止する方針だが、従来の石炭火力は更新に迫られており、これを補完することは難しい。このため、再生可能エネルギーとその出力変動をバックアップする天然ガスコージェネレーションへの期待が高い。ドイツ政府は2009年にCHP(Combined Heat and Power)法を改正し、2020年までにコージェネレーショ

ンの比率を 25% に引き上げる目標を設定している。水素インフラの普及も進めており、水素燃料電池への期待も大きい。

(2) 低酸素雰囲気による火災予防システムの普及

ドイツではデータセンターや倉庫などで、室内を低酸素雰囲気にして出火そのものを起こさせない火災予防システムが普及している。一般に窒素発生装置により空気から窒素を分離して室内に供給しているため、そのための設備投資が必要だけでなく、コンプレッサなどの高いエネルギー消費も課題となっている。

燃料電池は、燃料と空気を燃焼させて発電するガスエンジンとは異なり、電解質により隔てられた燃料と空気中の酸素の電気化学反応で発電する。燃料電池に供給された空気は、空気中の酸素だけが選択的に消費されるため、排出される空気は有害な燃焼排ガスを含まない低酸素濃度空気となる。この低酸素濃度空気を室内に供給し、低酸素雰囲気とすることで、窒素発生装置のインシャルコストとランニングコストを削減することができる。ドイツ N2telligence 社は、燃料電池からの低酸素空気を利用した火災予防システムを開発し、電気と温水、冷水、低酸素空気の四つの付加価値が提供できる Quattro Generation として販売している。

富士電機は、この Quattro Generation に対応するため、2010 年には N2telligence 社の試験場（ヴィスマール）で実証運転を開始した。2011 年に CE マークに適合した EU 向け機種を開発し、2012 年 7 月に Mercedes-Benz 社（ハンブルク）に 1 号機を納入した。図 6 にヴィスマールでの設置状況を、図 7 にハンブルクでの設置状況を示す。

4.3 CE マーク適合

欧州域内で製品を販売する場合、CE マークの貼付が義務付けられている。CE マークの貼付は、EU による統一法規の枠組みの中で設けられた制度で、EU 域内での自由な製品の流通を目的としている。逆に、CE マークが貼付されていない製品は、通関段階で拒否され輸出できないことになる。CE マークを製品に貼付するためには、対象となる EC 指令への適合性評価を実施し、製造メーカー自らの責任に基づいて指令適合宣言を行う必要がある。EC 指令への適合性の判定には、EN 規格が用いられる。

燃料電池は、一般的な電気製品と異なり小さな化学プラントの側面もあり、適用対象となる EC 指令や整合規格も電気や機械など多岐にわたる。先例がなかったため、公認機関の協力を得て、対象となる EC 指令と EN 規格の調査を行った。その結果、EC 指令として、機械指令、電磁両立性指令、圧力装置指令および爆発可能性雰囲気中で使用する機器の安全指令を対象とした。

日本向け燃料電池は、「電気事業法」、発電用火力設備の技術基準、電気設備の技術基準、JISなどを基に設計されている。EU 向けでは、日本の国内規格に準拠しつつ、さらに国際規格との相違点を追加で対応できるように設計を見直した。CE マークでは、ハザード解析によるリスク評



図 6 ヴィスマールに設置した燃料電池



図 7 ハンブルクに設置した燃料電池

価が非常に重要である。最も影響の大きい事象として可燃性ガス漏洩（ろうえい）を取り上げ、国際規格に準拠するため一部設計を変更した。また、ユーザによるメンテナンス作業のリスク評価も行い、感電やけがなどの発生を回避する対策を強化した。こうした対策により、2011 年 3 月に公認機関のチェックを経て、CE マーク適合の自己宣言書を発行した。

EU 向け 1 号機は、国内向けの燃料電池を基に設計し直したため、機器点数が増加する結果となった。現在、EU 向け専用機の設計を進めており、2013 年度に販売を開始する予定である。

5 あとがき

東日本大震災のときにも、運転中であった 100 kW 燃料電池は、停止することなく運転を継続した。このように災害時などにも自立運転モードを持ち、都市ガスと LP ガスとの燃料切替機能（オプション）を持つ 100 kW 燃料電池は、高効率の分散型電源として今後の普及が期待されている。

長年培った技術と燃料電池の特長を生かして、適用用途の拡大とユーザメリットの向上を推進し、地球温暖化防止および環境保護に貢献するために努力していく所存である。



腰 一昭

発電機および新エネルギーのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部新エネルギー技術部長。電気学会会員。



堀内 義実

燃料電池および新エネルギーのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部新エネルギー技術部。電気学会会員。



黒田 健一

燃料電池発電装置の製品開発，プラントエンジニアリングに従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部新エネルギー技術部主査。電気化学会会員。



水車・発電機の最新技術

Latest Technology for Hydraulic Turbines and Generators

塚本 直史 TSUKAMOTO Tadashi

高橋 正宏 TAKAHASHI Masahiro

藤井 恒彰 FUJII Tsuneaki

水車・発電機は、コスト低減や保守の簡素化に加え、環境に配慮した製品が望まれており、水車では、冷却水や操作油を不要にする水レス・油レスの技術開発が、発電機では補機省略と高速度化の技術開発が進められている。富士電機ではこれらに 대응するため、水車ではハイブリッドサーボをガイドベーン操作だけでなく、ランナベーンの開閉操作にも適用した。また、高速で大容量の水車発電電動機においては、回転子の強度解析技術、可変剛性型防振システム、ならびに補機の省略のための高速機向けスラスト軸受自己循環ポンプシステムを開発し、適用した。

For hydraulic turbines and generators, power companies seek products developed for cost reduction, ease of maintenance and low environmental impact. Advanced are being made in the development of water-free and oil-free technologies, which make cooling water and operation oil unnecessary, for hydraulic turbines and the development of technologies for reducing auxiliary machinery and increasing the speed of generators. In response to this, Fuji Electric has applied hybrid servo motors to opening and closing operation of runner vanes as well as guide vanes in hydraulic turbines. We have now expanded the scope of application to include runner blade divergence operation. Also, for high-speed, high-capacity hydraulic turbine generator motors, we have developed and applied strength-analysis technology for rotors, a variable-stiffness vibration control system, and a thrust bearing self-circulation pump system for high-speed generator motors to reduce auxiliary machinery.

1 まえがき

2011年の東日本大震災以降、原子力発電の代替エネルギーとして、再生可能エネルギーが脚光を浴びてきている。さらに「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」により、再生可能エネルギーの開発が加速されている。水力発電は安定した電源を確保できる発電方式であり、一般水力発電にはベース負荷としての期待が、揚水発電には再生可能エネルギーの増加に対する系統平準化技術としての期待が高まっている。

富士電機は、フォイト社と水力発電分野で協力をするため、富士・フォイトハイドロを設立し、各種新技術の開発に積極的かつ継続的に取り組んでいる。また、揚水発電についてもフォイトグループの技術をベースに開発に取り組んでいる。

2 最近の技術動向

これまで、コスト低減、保守の簡素化および環境への配慮の観点から冷却水などを不要にする水レスの技術と操作油などを不要にする油レスの技術が開発され、適用されてきた。最近では、次の新技術が導入されつつある。

- (a) ガイドベーン用ハイブリッドサーボの適用範囲の拡大
- (b) ハイブリッドサーボによる可動羽根水車ランナの電動化
- (c) 新素材の採用による水潤滑軸受の適用範囲の拡大

また、最近では流れ解析技術により、水車ランナの性能の予測精度が向上し、高性能のランナが開発が可能である。さらに、この技術により、既存の水車ランナの改造による性能向上も容易に予測できるようになり、出力増を目的と

したランナの更新が増加している。

一方、発電機においては、解析技術の進歩により、強度解析に加え振動解析などが精度良く行われるようになり、設計における信頼性が向上している。

3 水車の技術

3.1 ハイブリッドサーボ

国内の主な中小水力発電所のガバナにおいて、ガイドベーンを開閉操作する油圧操作式サーボモータに替わり、電動操作式サーボモータが採用されている。これは、保守が簡素化できるなど、電動操作式の優位性が広く認められたからにほかならない。しかしながら、電動操作式は、油圧操作式に比べて必要な操作力やガイドベーン閉鎖速度の面で劣っている。また、電動操作式はサーボの機械操作部に損傷が発生した場合、復旧に時間がかかるため、発電所の停止期間が長くなるという課題がある。これらの課題を解決するため、新しいタイプの電動操作式サーボモータの開発要求が高まっていた。

このような背景から、富士・フォイトハイドロでは早くからハイブリッドサーボの開発を行ってきた。これは、油圧操作式に対する電動操作式のメリットを継承しつつ、さらに大容量の発電所に適用することができ、従来の電動操作式サーボの弱点も補う新世代ガバナシステムである。

ハイブリッドサーボは、電動操作式サーボモータにより油圧シリンダを制御するシステムであり、これまでに数多くの発電所へ適用してきた。適用した実績には、ガイドベーンの開鎖速度が非常に速く、電動操作式サーボモータが採用できなかった制圧機付きフランシス水車の改修プロジェクトも含まれる。

3.2 ランナベーン開閉操作

カプラン水車や斜流水車などの可動羽根水車は、広範囲な流量で高効率な運転が可能である。山形県企業局の横川発電所と新野川第一発電所に納入した斜流水車では、ガイドベーンとともにランナベーンの開閉操作にもハイブリッドサーボモータを採用した。両発電所の仕様を表1に示す。

図1に、横川発電所（立軸斜流水車）のランナベーン開閉操作用ハイブリッドサーボモータを示す。最上部にはサーボモータを取り付けており、その下の円筒部にポンプユニットなどを収納している。なお、シリンダは水車軸内に設置している。

ランナベーン開閉操作のハイブリッド化は、図2に示す主機回転同期制御システムによって実現している。このシ

表1 水車の仕様

項目	横川発電所	新野川第一発電所
型式	VD-1RS	VD-1RS
出力	6,500 kW	10,500 kW
基準有効落差	57.0 m	99.8 m
回転速度	500 min ⁻¹	600 min ⁻¹



図1 ランナベーン開閉操作用ハイブリッドサーボモータ

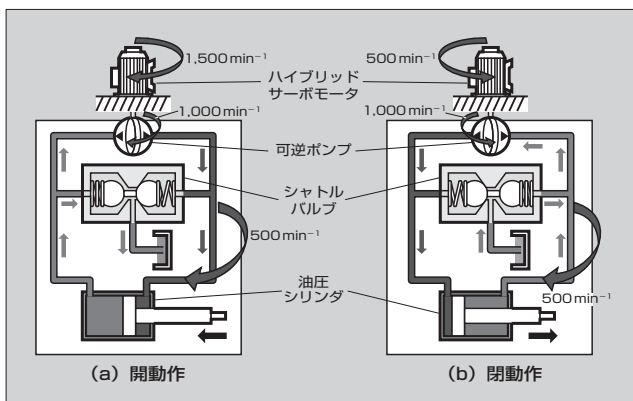


図2 ランナベーンのハイブリッド化
(主機回転同期制御システム)

ステムでは、ランナベーン駆動モータは発電機上部の静止部に設置されており、可逆ポンプやシャトルバルブなどのポンプユニットと油圧シリンダが発電機軸と水車軸の回転体内部（図2 枠内）に設けられている。

ランナベーン開閉操作は、駆動ポンプと主軸の相対的な回転速度を制御することによって油圧シリンダ内の圧力を調整することで行われる。

(a) ランナベーンの開閉動作を停止する場合

駆動モータと主軸とを同じ速度で回転させることで、駆動ポンプを相対的に停止状態にする。

(b) ランナベーンの開動作を行う場合

駆動モータを主機と同じ方向で、主軸より速い回転速度に制御する。これにより、駆動ポンプと主軸との回転速度差によるポンプ効果で油圧シリンダ内に圧力差が生じ、ベーン操作用ロッドを動作させている。主機定格回転速度が 500 min⁻¹ であれば、駆動モータを 1,500 min⁻¹ で正回転させることで、駆動ポンプは相対的に 1,000 min⁻¹ で正回転する。

(c) ランナベーンの開動作を行う場合

駆動モータを主機と逆方向に回転させる。その結果、回転部に設置された駆動ポンプは、主機と逆方向に回転し、開動作時と逆方向の圧力差が油圧シリンダ内に生じる。主機定格回転速度が 500 min⁻¹ であれば駆動モータを 500 min⁻¹ で逆回転し、駆動ポンプは相対的に 1,000 min⁻¹ で逆回転する。

この主機回転同期制御システムでは、通常の起動停止や非常時の急停止などを含めて、常に主機の回転速度の変動に応じて駆動モータの回転速度を制御し、指令されたランナベーン開度に制御した。

4 発電機の技術

富士・フォイトハイドロは、大容量揚水発電所である南アフリカ共和国・Eskom 社イングラ発電所の発電電動機（373 MVA, 50 Hz, 428.6 min⁻¹）を 2008 年に受注し、2013 年の据付け開始に向けて製作を進めている。

本発電電動機に採用した磁極およびリムの強度解析技術や高速大容量向け磁極巻線などの基礎的な技術、ならびに可変剛性型防振システムや高速大容量スラスト軸受自己循環ポンプシステムなどの特殊な技術を中心に、水車発電機技術について述べる。図3にイングラ発電所の発電電動機の断面を示す。

4.1 回転子の設計技術

(1) 回転子設計の要求事項

揚水発電所は、電力ピーク時の負荷対応が主な目的であるため、運転の特徴として、起動停止が頻繁に繰り返されることが挙げられる。揚水機は、一般的に落差が高いため高速に回転することが多く、回転子には高速回転による高い遠心力と温度上昇が生じる。さらに、頻繁な起動停止によって、遠心力と熱による繰り返し応力が生じる。そのた

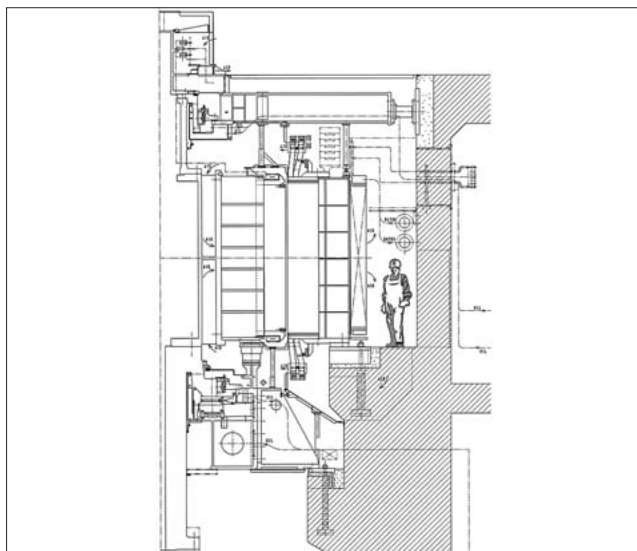


図3 イングラ発電所向け発電電動機の断面

め、疲労強度や熱応力・熱変形に耐える構造設計を行うことが重要である。

(2) 磁極と回転子リムの設計

遠心力は回転数の二乗に比例する。特に磁極と回転子リムの接合部や高応力部には、起動停止が繰り返されるごとに外部荷重による極めて高い応力が繰り返し作用する。また、形状が大きく変化する部分には高い応力が集中する。このような部位については、低サイクル疲労および高サイクル疲労の十分な寿命評価に基づいて構造を決定する必要がある。

図4に、イングラ発電所向け発電電動機の磁極およびリムの応力解析結果を示す。磁極のリムへの取り付け部やリムの磁極支え部は、応力の集中を避ける形状とした。

(3) 磁極巻線の設計

磁極巻線においては、繰り返し発生する熱応力・熱変形に対して考慮する必要がある。界磁巻線は、運転中に作用する遠心力により、界磁巻線の外周部にある絶縁フランジに押し付けられる。この状態で電流が流れると、界磁巻線は温められ熱膨張が起きる。

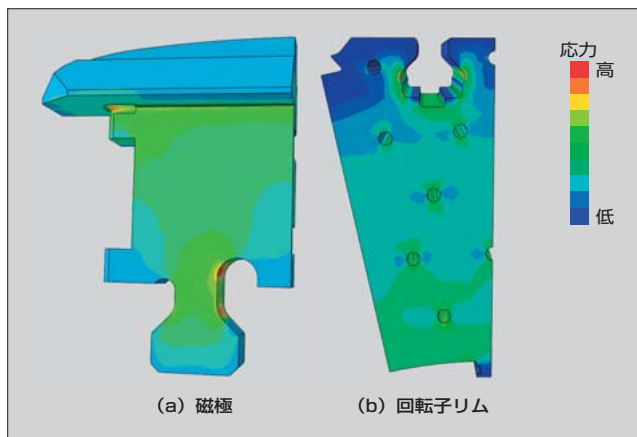


図4 イングラ発電所向け発電電動機の磁極および回転子リムの応力解析

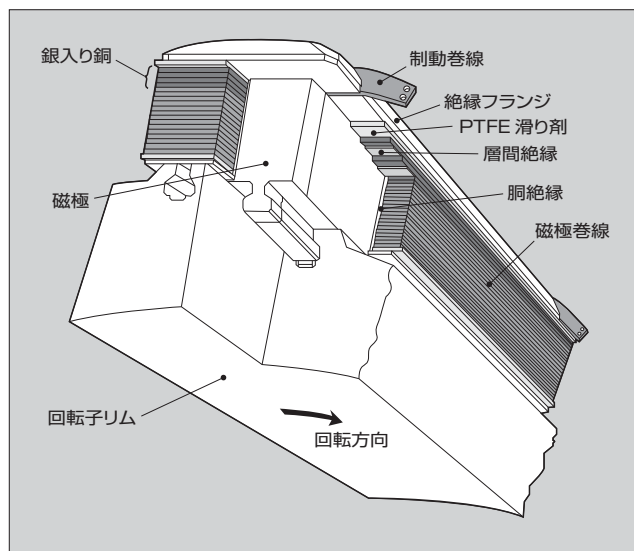


図5 イングラ発電所向け発電電動機の磁極巻線の構成

遠心力による力と熱膨張による力は方向が異なるため、この相互関係は、絶縁板と界磁巻線間の摩擦係数によりバランスを取る。遠心力は、絶縁フランジと界磁巻線間の摩擦係数により、熱膨張の伸びを妨げる力となる。この伸びを妨げる力と熱膨張による力の差が界磁巻線に加わり、界磁巻線の内部に圧縮応力となり蓄積する。一般的に界磁巻線に使用されている銅板は、クリープ特性が悪く、内部に蓄積した圧縮応力は運転中に緩和してしまう。一方、停止時には、クリープにより圧縮応力が緩和した場合、磁極巻線は熱収縮を起こす。そのため、磁極巻線には起動停止ごとに引張応力が発生し、最悪の場合には、切断してしまう。

図5に、イングラ発電所の磁極巻線の構成を示す。同機は大容量高速機であり、磁極巻線の軸方向長さが長いいため熱膨張量が大きく、高速機であるため遠心力が大きい。加えて、揚水機であるため起動停止の頻度も極めて高い。これらのことから磁極巻線の設計において、外周側の巻線にクリープ特性に優れた銀入り銅を使用した。

4.2 防振ビームシステム

(1) 防振ビーム設計の要求事項

高速大容量機では、多くの場合、トルクに対する軸の剛性を十分持たせており、軸系の剛性は軸を支持する構造物の剛性に支配される。特に、発電電動機の上軸受については、軸系の危険速度を上げるため、基礎コンクリートとの間に防振ビームを配置して支持剛性を向上させることが多い。

防振ビームの設計は、防振ビームの熱膨張を考慮しなければならない。運転中は、発電機室の内部は温度が上昇し、発電機の各部に熱膨張が起きる。一方、コンクリート基礎は、発電機の運転中もほとんど熱膨張が起きないため、両者の間には無視できない変位差が発生し、防振ビームには変位差に相当する大きな内部荷重が発生する。この荷重のため、軸受が軸受隙間以上に収縮することで、軸受の焼付けやコンクリート基礎が破損する事例が報告されている。

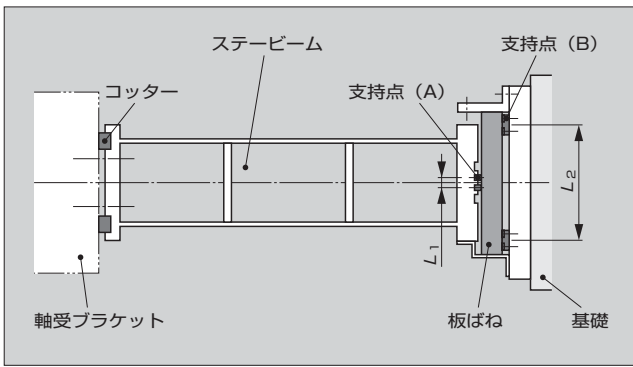


図6 固定剛性型防振ビームシステム

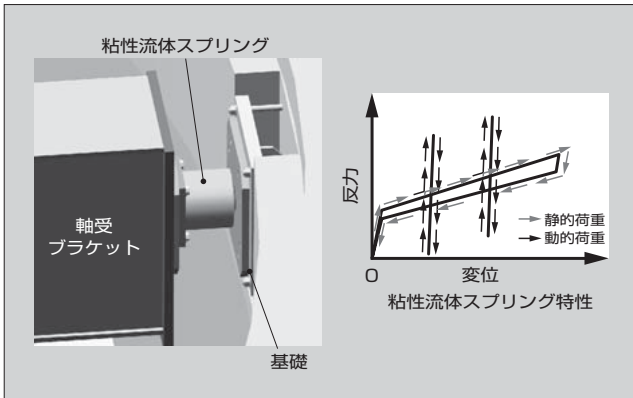


図7 イングラ発電所向け可変剛性型防振ビームシステム

これらの事例に対処するためには、内部荷重を構造的に緩和する方が必要になる。

(2) 固定剛性型防振ビームシステム

図6に、板バネを使用した従来型の固定剛性型防振ビームシステムを示す。この構造は、内部荷重を緩和しつつ振動に対する必要剛性を確保するために開発したものである。支持点(A)、(B)の位置を適切にすることで防振ビームの剛性値が最適になるように設計するが、熱膨張に対しても振動力に対しても同じ値である。

(3) 可変剛性型防振システム

イングラ発電所向けに採用した新型の可変剛性型防振システムを図7に示す。粘性流体スプリングは、熱膨張や熱収縮のようなゆっくりした変位に対しては内部荷重をほとんど発生させることなく追従し、振動荷重のような比較的高周波の荷重に対しては高い剛性を示す。よって、本システムは熱膨張による軸受隙間の減少やコンクリート基礎への高荷重を防ぎつつ、軸系には高い支持剛性を発揮する。

本システムは、既に複数の適用実績があり、良好な結果が報告されている。

4.3 高速大容量スラスト軸受自己循環ポンプシステム

軸受潤滑油システムは、軸の回転による遠心力を利用した自己循環ポンプシステムと、外部にポンプシステムを置いた強制給油システムに大別される。一般的には、付属機器の配置スペースやメンテナンスを考えると自己循環ポンプシステムの適用が望ましい。しかし、軸回転部の周速度

が高いと、軸のポンプ穴入口部が油面から空気を吸い込み、ポンプ作用が著しく低下する。このため、従来は、40 m/s 近辺を目安として適用限界を定めてきた。

富士電機および富士・フォイトハイドロでは、自己循環ポンプシステムの適用限界を引き上げるため、実機大の実験装置(図8)を製作し、新システムを開発した。この実験装置は、ポンプの吸い込み性能および吐出時の圧力損失を改善するとともに、軸受回転部の周速度が70 m/s まで適用可能なシステムである。

イングラ発電所は軸受回転部の周速が58 m/s であり、



図8 70 m/s 級自己循環ポンプ実験装置

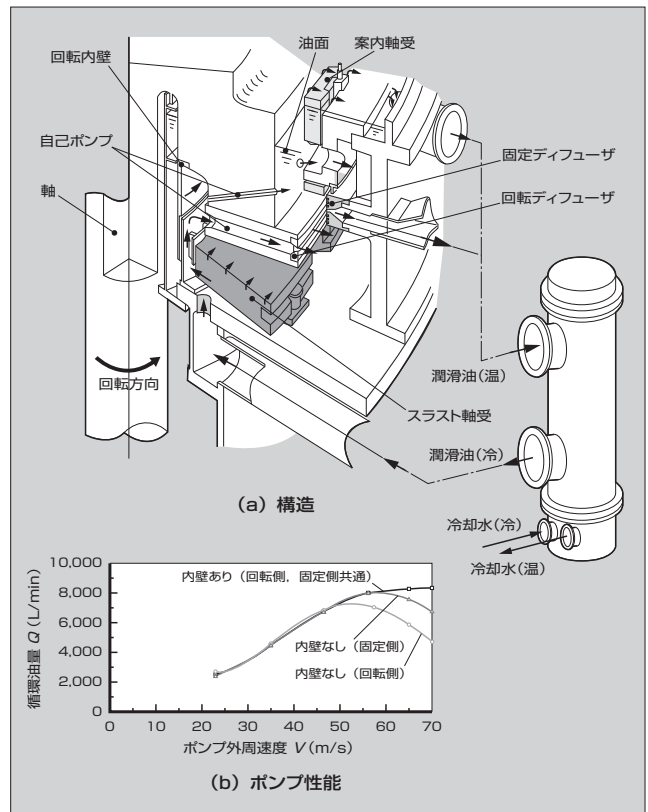


図9 イングラ発電所向け自己循環ポンプシステムの構成

本システムの適用を提案し、採用された（図9）。

5 あとがき

水車・発電機の最新技術について述べた。これらの技術は、水力発電全般に適用できるものであり、機器の特徴に応じた効果的な適用を行っていく。

今後も、新技術の開発を積極的に推進し、水力発電の発展に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 早馬弘ほか. ハイブリッドサーボシステム. 富士時報. 2003, vol.76, no.9, p.572-576.
- (2) 早馬弘, 藤井恒彰. 最新の水車技術と適用事例. 富士時報. 2008, vol.81, no.5, p.335-340.
- (3) 氏家隆一ほか. 揚水発電向け発電電動機の技術. 富士時報. 2008, vol.81, no.5, p.341-346.



塚本 直史

水車の開発・計画・設計に従事。現在、富士・フォイトハイドロ株式会社設計部長。工学博士。ターボ機械協会会員。



高橋 正宏

水力発電所のエンジニアリング業務に従事。現在、富士・フォイトハイドロ株式会社技術部長。電気学会正員。



藤井 恒彰

水車および発電機の開発・設計に従事。現在、富士・フォイトハイドロ株式会社設計部マネージャー。工学博士。日本機械学会会員、ターボ機械協会会員。



水力発電プラントの機器更新技術

Equipment Replacement Technology at Hydroelectric Power Plants

高橋 正宏 TAKAHASHI Masahiro

水力発電では、老朽化した機器の更新計画が増加する傾向にある。特に韓国では、既設の構造物を流用し、設備保全と出力増を目的とした水車・発電機および制御装置の更新が順次進められている。ゲサン発電所では、運転開始から50年以上経過した吸出し管、ケーシングなどの埋設部を流用し、その他の老朽化した機器の更新を行った。水車の効率特性およびキャビテーション特性を流れ解析により予測して、確実な性能設計を行った。水車では、水潤滑軸受、無給水メカニカルシール、ガイドベーン操作のハイブリッド化などを採用し、発電機では樹脂軸受を採用して保守を簡素化した。

There has been an increase in replacement planning for old machinery at hydroelectric power plants. In Korea in particular, existing structures are being appropriated and hydraulic turbines, generators and control equipment is being replaced in turn for the purpose of maintaining facilities and increasing output. At Korea's Goesan power plant, which has seen more than 50 years of operation, embedded parts such as draft tubes and casings were appropriated, and other old machinery was replaced. Cavitation characteristics and efficiency characteristics of hydraulic turbines were calculated through flow analysis, and thereby conducting performance design surely. Simplification of maintenance was achieved through such measures as employing water-lubricated bearings, water-free mechanical seals and hybridization of guide blade operation for hydraulic turbines as well as employing plastic bearings for generators.

1 まえがき

2011年3月の東日本大震災以降、原子力発電の代替エネルギーとして再生可能エネルギーが着目されるようになった。さらに、2012年7月に開始された「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」により、再生可能エネルギーの開発が大きな転機を迎えている。運転開始から50年を超えた発電所では、老朽化した既存設備の更新計画が増加する傾向にある。また、機器の更新に合わせて性能向上を行うことが多い。海外においても同様な傾向にあり、特に韓国では既設の土木構造物や建築構造物を流用し、設備保全と高効率化を目的とした機器の更新工事が順次進められている。

このような状況の中、富士電機とドイツのフォイト社との合弁会社として2007年に設立された富士・フォイトハイドロは、韓国水力原子力会社(KHNP)ゲサン発電所1,2号機向けとチョピョン発電所3号機向けに、水車・発電機および制御装置の更新を進めており、ゲサン発電所1,2号機は、既に商業運転を開始している。

本稿では、ゲサン発電所向け水車・発電機を例にして、水力発電プラントの機器更新技術について述べる。

2 ゲサン発電所の概要

ゲサン発電所は韓国・ソウルの南西152kmの地点に位置し、1957年に運転を開始した。今回の改修は、土木構造物に影響を与えないように、吸出し管、ケーシングおよび発電機の基礎を流用し、老朽化した機器の更新を行うとともに、水車の性能向上により発電所の出力増を図るものである。表1に改修前後の機器の仕様比較を示す。既設の水車・発電機は他社製であったため、更新する機器と流用す

る機器との取合いに十分な注意が要求された。

なお、発電機は韓国メーカーから一式調達し、水車との取合いや新技術が適用される部分については、富士・フォイトハイドロがとりまとめた。

また、将来の無人化運転を目的とした保守の簡素化の要求にも応えるため、表2に示す技術を水車・発電機に適用した。

表1 水車・発電機の仕様

項目		改修後	改修前
水車	形式	立軸プロペラ水車	立軸カプラン水車
	台数	2台	
	最大出力	1,500 kW	1,444 kW
	有効落差	22.4 m	
	使用水量	7.76 m ³ /s	
	比速度	477 m-kW	468 m-kW
	ランナ径	1,067 mm	
	ランナ羽根枚数	3枚	
発電機	形式	立軸三相同期発電機	
	冷却方式	出口管通風方式	
	台数	2台	
	出力	1,570 kVA	1,500 kVA
	電圧	3.3 kV	
	力率	0.9	
	回転数	600 min ⁻¹	
周波数	60 Hz		

表2 ゲサン発電所向け水車・発電機に適用した技術

目的	適用技術
保守性向上	水車の水潤滑軸受 無給水メカニカルシール ハイブリッドサーボモータ 発電機の樹脂軸受
出力向上	CFDによる水車性能設計

3 水車

ゲサン発電所では既設の埋設部品を流用することから、流用部品と更新部品との取合いなどに十分な注意を払って性能設計や構造設計を行っている。

3.1 CFD解析による性能設計

水車の効率は、模型試験で性能が確認されているベスラインモデルと、流用する既設ケーシング、吸出し管などとの流路形状の違いによる損失の増減を、CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析で評価して予測した。図1に流れ解析結果の例を示す。また、吸出し高さを既設に合わせる必要があるため、性能設計に当たってはキャビテーション特性と効率性能を含めた最適化を行う必要があった。キャビテーション特性の評価は、流れ場の中の気泡の存在が流れに及ぼす影響を正しく評価できる二相流解析により実施した。図2に二相流による解析結果の例

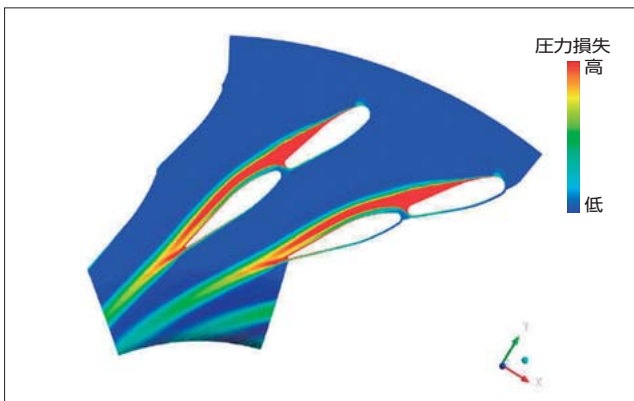


図1 流れ解析結果の例

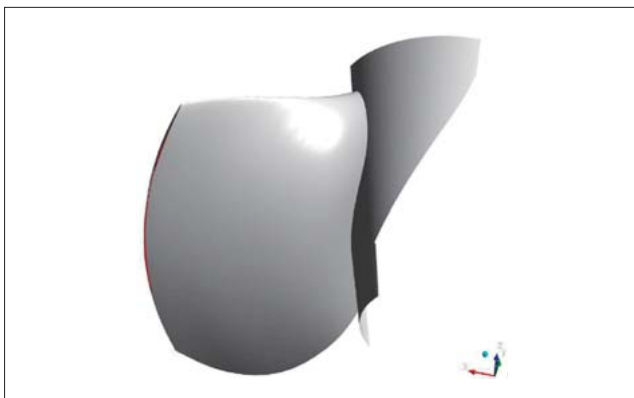


図2 二相流解析結果の例

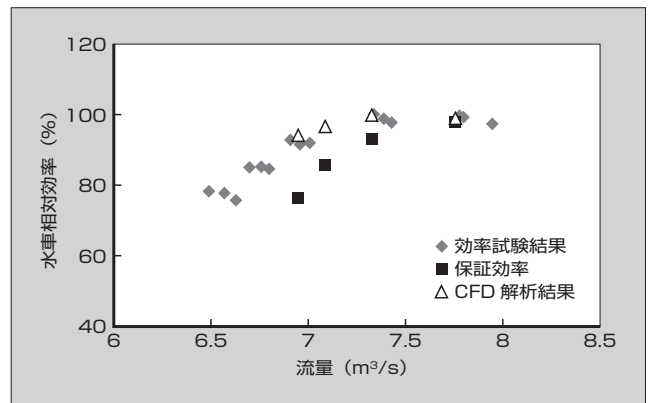


図3 水車効率特性

を示す。図において白く見える部分が気泡の存在を示している。

水車効率について、CFD解析の結果と圧力時間法で測定した現地効率試験の結果を図3に示す。現地効率試験で得られた水車効率は、保証効率（要求された効率）を満足している。また、CFD解析での予測が、実機の効率によく一致していることが確認できた。

3.2 水車の構造

水車の断面を図4に示す。本発電所の水車では、補機の簡素化と環境への影響を配慮して、次に示す新技術を適用している。

- 軸受潤滑：水潤滑方式
- 主軸封水：無給水メカニカルシール方式
- ガイドベーン操作：ハイブリッドサーボモータ方式

(1) 軸受潤滑

水車軸受は円筒型構造とし、材料には膨潤の少ない新型水潤滑材を使用した水潤滑方式を採用している。さらに、水車軸受と一体となって回転する軸受水槽を設けた。遠心力で水を循環させる回転水槽形を採用することにより、冷却水自蔵式とし給水装置を不要にした。この軸受潤滑は、

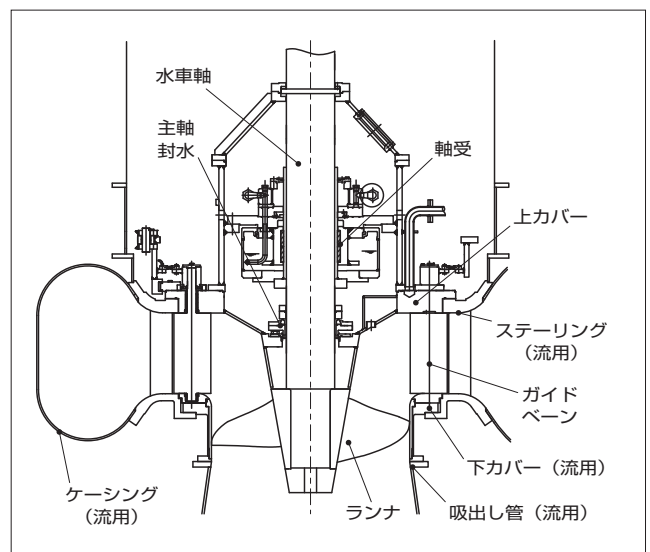


図4 水車断面図

従来のカプラン水車に採用されている回転油槽形を、水潤滑方式の軸受に応用したものである。図5に軸受部の構造を示す。

(2) 主軸封水

一般的に水車の主軸封水には、グラウンドパッキン方式あるいはメカニカルシール方式が採用される。ゲサン発電所では給水装置の省略によるメンテナンスフリー化を目的として、ポンプなどに採用されている無給水メカニカルシール方式を採用した。従来のメカニカルシールでは、過渡時のシール部への水切れを防止するために給水を行っていたが、シール材の見直しにより無給水化を実現した。

(3) ガイドベーン操作

ガイドベーン操作を従来の油圧方式からハイブリッドサーボモータ方式に変更した。ハイブリッドサーボモータ方式は、可逆ピストンポンプから高圧の圧油を直接シリンダに送り込み、ガイドベーンを操作するものであり、一般的に採用されている電動サーボ方式よりも小型化が可能である。この小型化により、既設の限られたスペースに設置できるため、基礎の流用が可能になった。また、水車には入口弁が設置されていないことから、非常時のガイドベ

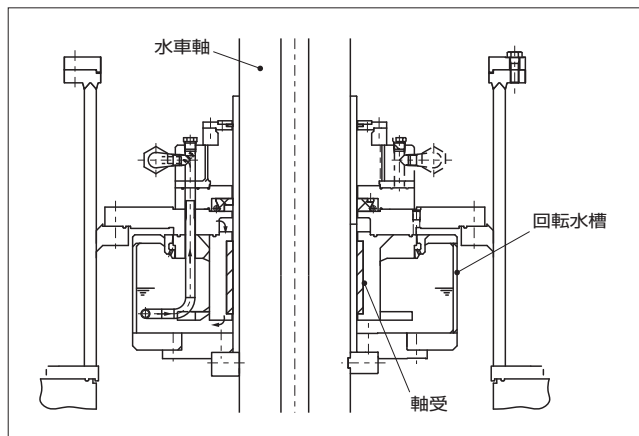


図5 水車軸受部の構造

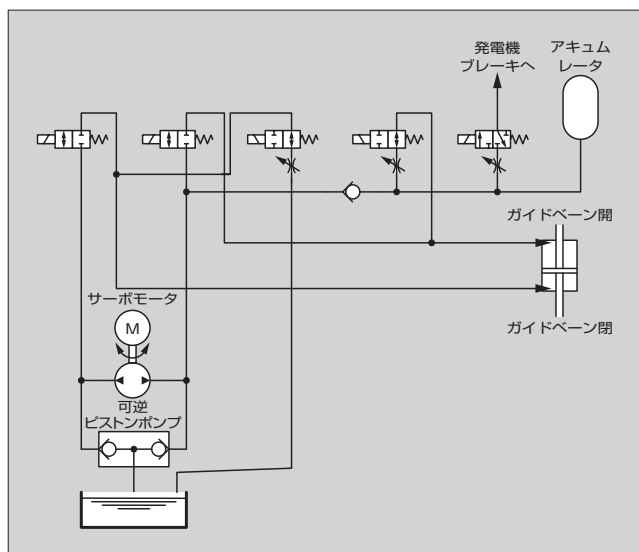


図6 ハイブリッドサーボ操作系統図

ン緊急閉鎖用にアキュムレータを設置し、発電機のブレーキ操作にもこのアキュムレータの圧油を使用した。図6にハイブリッドサーボ操作系統図を示す。

4 発電機

発電機は基礎のみを流用し、一式を更新した。設計を含めて韓国メーカーから調達したが、仕様検討と設計において、危険速度計算、軸受基本検討およびブレーキの選定を、富士・フォイトハイドロが主体となって実施した。図7に発電機の断面を示す。

4.1 冷却方式

発電機の冷却方式は既設と同様の出口管通風方式とし、既設の出口管とダンパを流用した。

4.2 発電機の軸受

軸受配置は、発電機上部にスラスト軸受と案内軸受を、発電機下部に案内軸受を配置する普通型である。いずれの軸受にも樹脂軸受を採用し、起動時の摩擦力の低減と保守の簡素化を図った。図8に軸受の構造を、表3に軸受の仕様を示す。

上部軸受はスラスト軸受と案内軸受で構成され、発熱量が大きい。このため、軸受の冷却に潤滑油をポンプで循環させ、外部に設けた電動ブロア付空冷ラジエータで冷却する強制給油循環方式を採用した。下部軸受は案内軸受だけであり、その発熱量は小さいので、油自蔵空冷方式を採用した。

4.3 ブレーキ

一般的には、補機の簡素化の観点から、ガイドベーン操作を電動化した場合には電磁ブレーキを採用する。しかし、

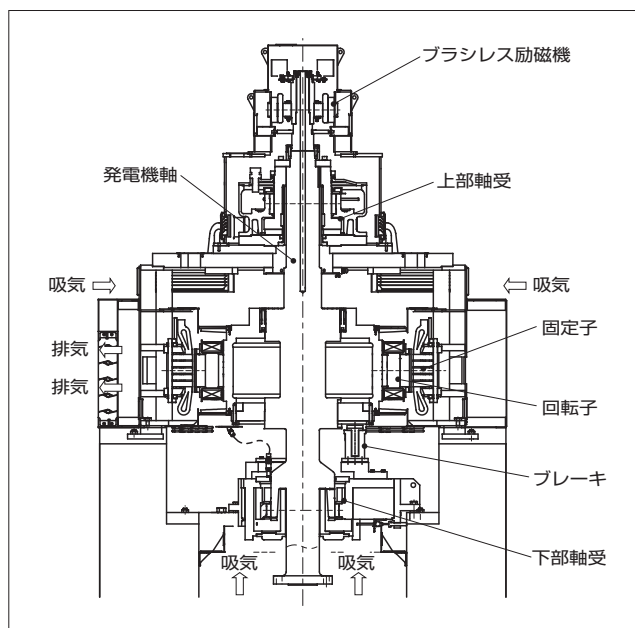


図7 発電機断面図

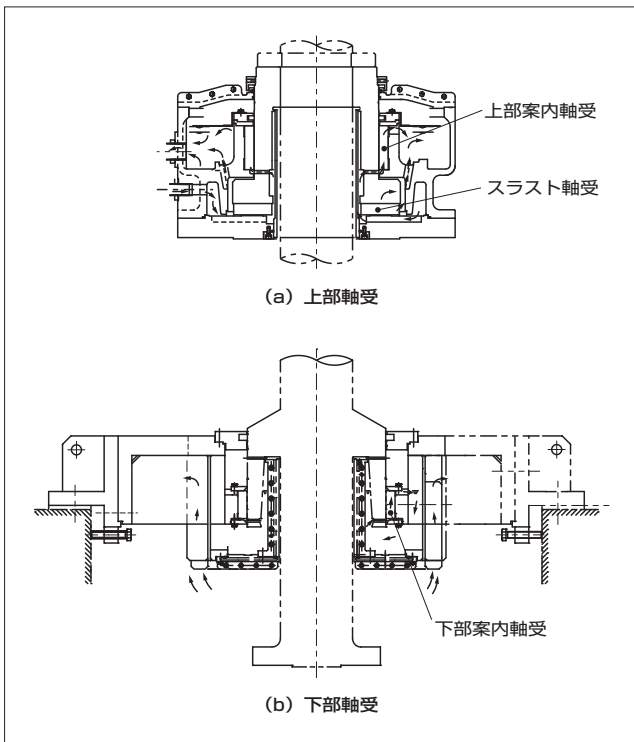


図8 発電機軸受部の構造

表3 発電機軸受の仕様

	スラスト軸受	上部案内軸受	下部案内軸受
材質	樹脂	樹脂	樹脂
潤滑方式	強制給油循環	強制給油循環	油自蔵空冷
潤滑油種	ISO VG32	ISO VG32	ISO VG32
面圧	2.16 MPa	0.31 MPa	0.44 MPa
軸受損失	11.4 kW	2.3 kW	2.2 kW

本発電機においては、入口弁が設置されていないため、水車のガイドベーンからの漏水によるトルクが大きく、それに抗して停止状態を維持するためには、複数台の電磁ブレーキが必要である。しかし、既設の基礎を流用するため寸法が決められており、十分な数のブレーキを設置することができなかった。

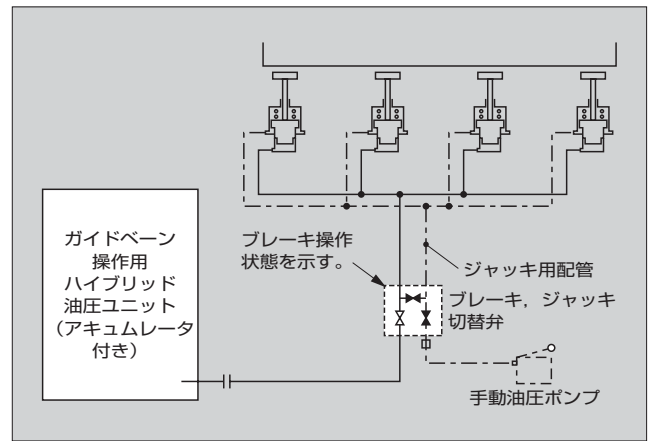


図9 油圧ブレーキの構成

そこで、ゲサン発電所ではハイブリッドサーボの油圧システムを利用した油圧ブレーキを採用した。図9にその構成を示す。ブレーキはジャッキを兼用する構造となっている。また、油圧システムにブレーキ用のアクムレータを追加することでブレーキの操作が可能のため、新たな補機の設置を必要としない。

5 あとがき

ゲサン発電所向け水車発電機を例にして、水力発電プラントの機器更新技術について述べた。老朽化した設備の更新により、性能の向上や保守性の向上も図ることができ、ランニングコストの低減が可能になる。既設設備の更新が今後さらに増加すると思われる、今回述べた技術が参考になると考える。

今後も、水力発電機器の保守の簡素化に向けた技術を開発していく所存である。



高橋 正宏

水力発電所のエンジニアリング業務に従事。現在、富士・フォイトハイドロ株式会社技術部長。電気学会正員。

汚染土壌乾式除染・減容技術

Technology for Dry Decontamination and Volume Reduction of Contaminated Dirt

神坐 圭介 JINZA Keisuke

富塚 千昭 TOMIZUKA Chiaki

東日本大震災により発生した福島第一原子力発電所の事故によって放射性物質が放出され、環境汚染が生じている。除染のために削り取った土壌から汚染レベルの高い土を分離すれば保管が必要な量を減らすことができる。

富士電機は、宇部興産機械株式会社と共同で汚染土壌乾式除染・減容技術の開発を行った。一般産業で使用実績のある乾式分級・研磨装置と放射能計測装置を組み合わせたものであり、大量処理が可能な技術である。実際の汚染土を用いた実証試験において、研磨・分級後の放射能濃度が半分以下に低下していることが確認できた。

The Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident, caused by The Great East Japan Earthquake, has resulted in leakage of radioactive materials and contamination of the environment. Separating highly-contaminated dirt from the total amount of dirt removed for decontamination makes it possible to reduce the volume of dirt that needs to be stored.

In cooperation with Ube Machinery Corporation, Ltd., Fuji Electric developed technology for dry decontamination and volume reduction of contaminated dirt. This technology combines the dry sorting and grinding equipment used in general industry with a radiation measurement device, enabling mass processing. Verification tests using actual contaminated dirt have demonstrated that radiation levels are reduced to less than half after crushing and separation.

1 まえがき

東日本大震災により発生した福島第一原子力発電所の事故によって放射性物質が放出され、環境汚染が生じている。放出された放射性物質は主にセシウムであり、土壌や森林に付着している。国は、この事故に由来する放射性物質による被ばく線量を年間1mSv以下となるように除染を計画している⁽¹⁾。

除染計画では、汚染した田畑などは、表層数cmの土壌を削り取り除染することを検討している。これによって大量の土壌が汚染廃棄物として発生する。この土壌（原土）は適切な場所に仮置きし、中間貯蔵を経て最終処分が行われる計画である。しかし、除染は広範囲であり、全量を保管するには広大な場所が必要であるが、その確保が難しいため、除染作業がはかどらないという課題がある。

削り取った原土は全てが汚染されているのではなく、汚染レベルの高い土を分離できれば、保管が必要な量を減らすことができる。そこで、汚染土壌の乾式除染・減容技術の開発を行った。本稿では、その技術の特徴と実証試験について述べる。

2 汚染土壌乾式除染・減容技術の特徴

公的および民間の研究機関によると、土壌の放射性セシウムによる汚染は、表層数cmに集中しており、その土壌の中でも粘土、シルトといった細粒子部分に多くの放射性セシウムが付着していることが報告されている⁽¹⁾。

〈注〉「平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」平成23年8月

富士電機は、汚染土壌を減容するために、乾式除染・減容技術を、宇部興産機械株式会社と共同で開発した。

2.1 乾式除染・減容処理フロー

本技術に基づく処理フローを図1に示す。本技術のポイントはA部であり、その詳細は次のとおりである。

(a) 見かけの粗粒子の砕き

細粒子が固まって見かけ上粗粒子となっている土を、ミルにより砕く。

(b) 細粒子の剥離

粗粒子表面に付着している細粒子を、ミルによる研磨によって剥ぎ取る。

(c) 粗粒子表層の研磨

放射性セシウムが吸着している粗粒子表層を、ミルによる研磨によって剥ぎ取る。

(d) 乾式分級

粒径による仕分けを乾式分級により行う。

これらの一連の工程により、汚染の高い土壌と低い土壌とに仕分けられる。

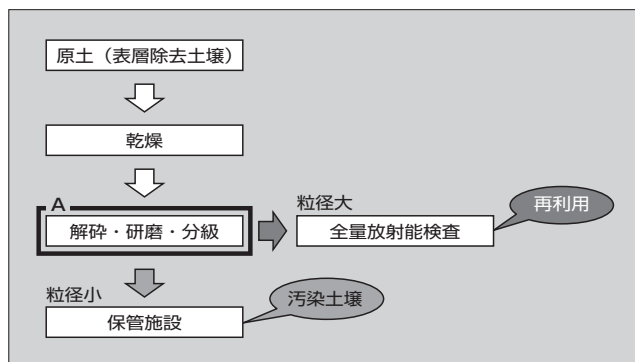


図1 乾式除染・減容処理フロー

2.2 乾式除染・減容処理の特徴

本技術は、一般産業で使用実績のある乾式分級・研磨装置と放射能計測装置を組み合わせたものであり、大量処理が可能な技術である。特徴は次のとおりである。

(1) 水や薬品などを使用しない処理方式

汚染土壌の減容に関して先行研究が行われている土壌湿式処理方式と異なり、水や薬品を使用しないので、これらの使用に伴う二次廃棄物の処理の手間や費用がかからない。また、薬品処理や高温処理を行わないため、原土本来の性状が損なわれにくい。

(2) 分級処理・減容・保管場所の省スペース化

乾式分級技術は、土壌再利用のための任意の分級しきい値を設定することができるため、さまざまな土壌に適した減容処理を行うことが可能である。湿式処理が適用しにくい水田の土壌への適用性も基礎試験で実証した。

汚染廃棄物として保管する土壌に仕分けられた土壌は、さらに脱気・圧縮により容積を減容することが見込める。これによって、さらに保管場所の省スペース化を図ることが可能である。

(3) 再利用する土壌の放射能濃度の全量計測による安全・安心の付与

富士電機が既に商品化している「食品放射能測定システム」の原理を土壌に適用した土壌モニタにより、仕分けられた土壌のうち、再利用可能な低汚染土壌の放射能濃度を連続的に全量を計測する。

放射能濃度の分析を外部に委託する場合、結果が分かるまで数日かかるが、本技術ではリアルタイムで計測結果がわかるため効率的に作業が行える。土壌の種類、汚染の仕方に応じて分級条件などの設定を変える場合でも、放射能濃度がどう変化したかをその場ですぐに確認でき、効率的である。

(4) 低コスト

初期コストやランニングコストを考慮して処理コストを試算した。本技術は、汚染水処理が不要であり、二次廃棄物処理費用が発生しないため、湿式除染に比べて1/3～1/4の低コストである。

3 乾式除染・減容プラント

乾式除染・減容プラントは、移動式と定置式の2種類を計画している。

移動式プラントは、トレーラーに必要装置を搭載することで、必要な場所へプラントを移動することができる。設置や撤去が容易なので、地元の理解と除染作業をスムーズに進められることが期待できる。除染効果を追求した機器構成としているので、比較的線量の高い区域での適用を想定している。移動式プラントのイメージを図2に、処理フローを図3に示す。

定置式プラントは、処理量と減量効果を追求した機器構成としているので、比較的線量の低い区域で多量の土壌を

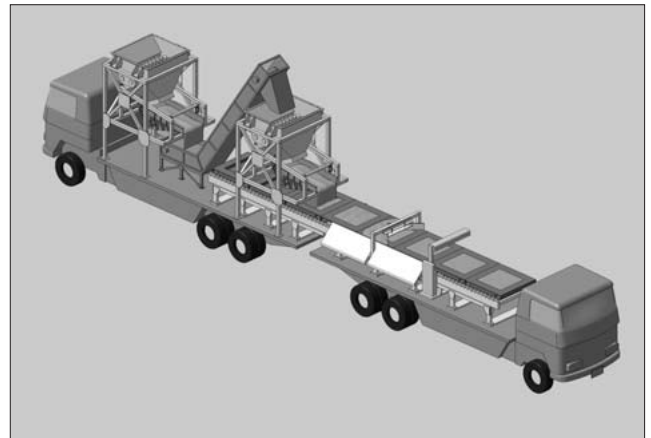


図2 移動式プラントのイメージ

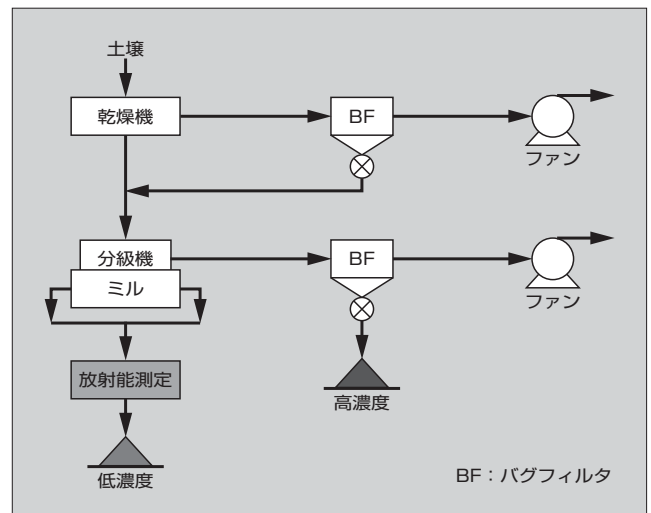


図3 移動式プラントの処理フロー

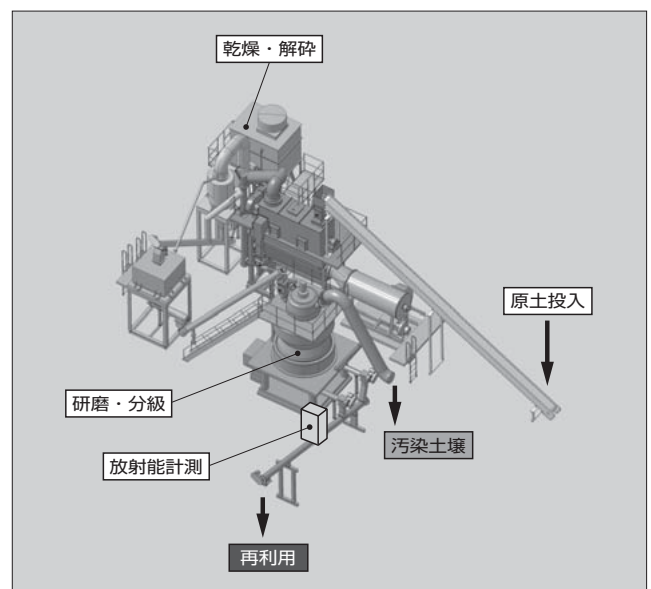


図4 定置式プラントのイメージ

除染する場合を想定している。定置式プラントのイメージを図4に、乾式除染・減容プラントの仕様を表1に示す。なお、処理後に再利用可能な土壌の原土に対する質量の割

表1 乾式除染・減容プラントの仕様

	移動式	定置式
除染率*1	50～86%	20～60%
減量率*2	30～50%	50～70%
処理能力 (WB)	3t/h	20t/h
設置スペース	W18×H7.5×D28 (m)	W20×H10×D35 (m)
設備動力	350 kW (発電機軽油)	650 kW (固定電源)
乾燥室	灯油	灯油

*1：除染率：処理後に再利用可能な土壌の原土に対する放射能濃度の低減率
 *2：減量率：処理後に再利用可能な土壌の原土に対する質量の割合

合を減量率という。表中の数値は、土壌除染・減量の基礎試験結果の一例である。土壌の種類や場所によって汚染の状況が異なるため、効率的な分級粒子径（粒径で区別するしきい値）や除染性能が異なる。今後、種々の土壌においてデータの蓄積を図る予定である。

4 実証試験

本装置の基本原理を実証するため、「平成23年度除染技術実証事業」(環境省)⁽²⁾⁽³⁾において、実際の汚染土壌を使用した実証試験を実施した。

4.1 土壌特性

土壌の違いによる除染や減量効果の違いを把握するため、細粒褐色低地土（水田）、礫質（れきしつ）褐色低地土（畑）、細粒褐色森林土（森林）の3種類の土壌についてサンプルを採取し、除染・減量試験を実施した。試験結果の一例として、分級点の粒子径を75μmとした場合の土壌ごとの除染効果を図5に示す。研磨前と研磨・分級後の各粒子径ごとの放射能濃度を示している。いずれの場合でも粗粒子側では、研磨・分級後の各粒子径の放射能濃度が半分以下に低下していることが確認できた。これにより、本装置の基本原理である、(a)見かけの粗粒子の砕き、(b)細粒子の剥離、(c)粗粒子表層の研磨、(d)乾式分級が実現可能であることが確認できた。

4.2 分級点と除染効果

研磨前後における土壌の放射能濃度について、分級点をパラメータとして整理した結果を図6に示す。

放射能濃度が8,000 Bq/kgの原土を研磨した後、45μmで分級した場合、放射能濃度は4,000 Bq/kgに低減した。また、75μmで分級した場合は、放射能濃度が2,000 Bq/kgに低減した。ただし、分級粒子径を小さくすると減量率が低下する。

汚染の低い土壌を再利用する場合、対象となる土壌に対して図6のグラフをあらかじめ作成することにより、再利用できる土壌の放射能濃度および物量を推定できる。規制基準値の今後の動向を待つことになるが、原土の汚染状況を踏まえた除染計画の詳細な立案が可能になる。

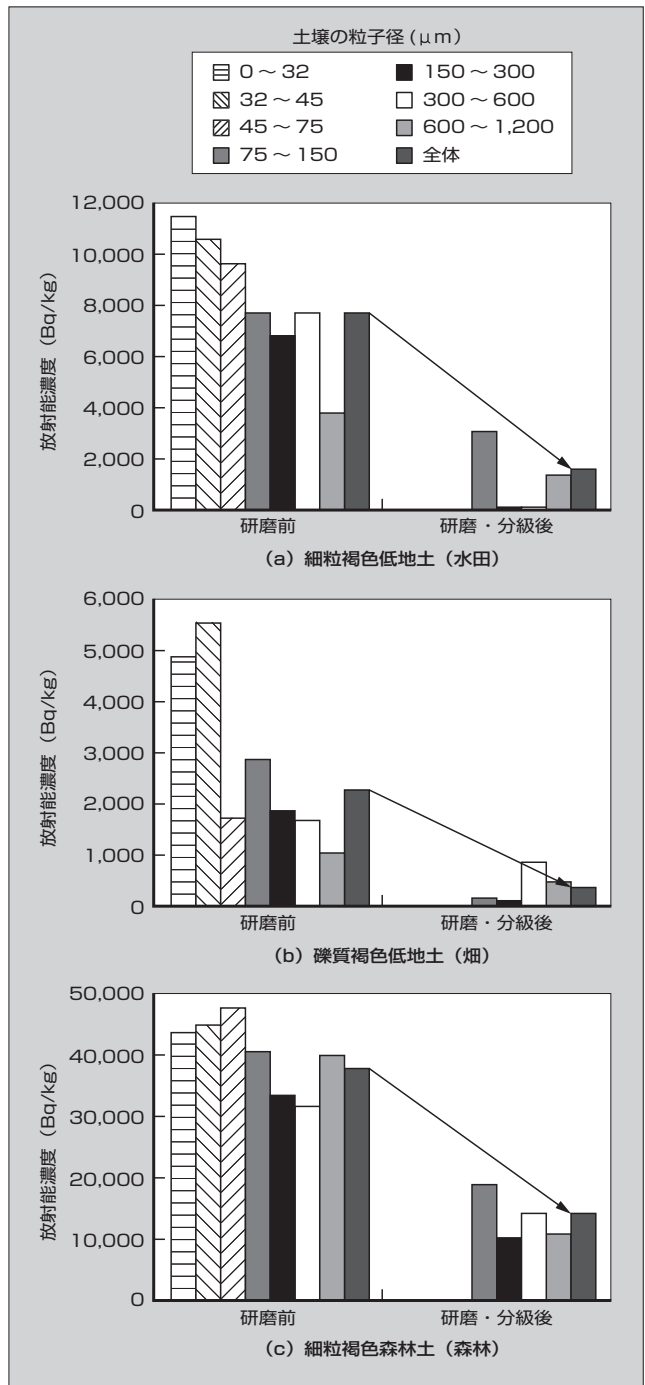


図5 土壌ごとの除染効果（分級点の粒子径 75 μm）

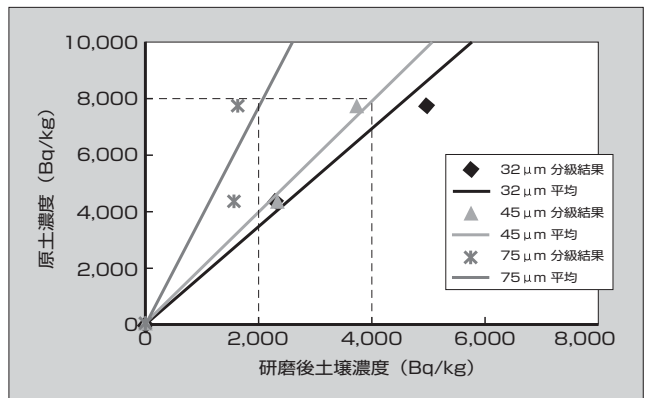


図6 分級点による除染効果（細粒褐色低地土：水田）

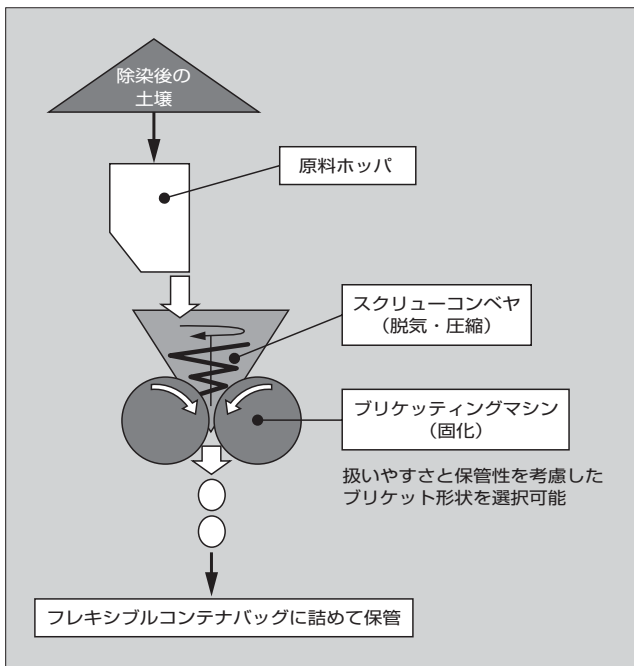


図7 高線量土壌の減容フローの例

5 今後の展開

除染処理した後の放射能濃度が高い土壌を脱気・圧縮，固化する工程（図7）を追加することによって，容積をさらに減容することが見込める。これによって仮置場所，中間貯蔵施設などに必要なスペースをさらに少なくすることが期待できる。乾式除染の総合的効果を評価するために，今後，脱気・圧縮，固化による減容効果を把握する必要がある。

6 あとがき

放射性物質による汚染土壌の乾式除染・減容技術について述べた。今後も，東日本大震災ならびに福島第一原子力発電所の事故からの復旧・復興に貢献できる技術を開発する所存である。

今回の実証試験は，「平成23年度除染技術実証事業」（環境省）において，富士古河E&C株式会社の下，実施した。実施に際してご指導いただいた環境省殿，日本原子力研究開発機構殿に謝意を表する。

参考文献

- (1) “農地土壌の放射性物質除去技術（除染技術）の開発の取組について”. 農林水産省.
<http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/110914.htm>（参照 2012-10-23）.
- (2) “平成23年度除染技術実証事業”. 環境省.
http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/tech_gaiyo-201208.pdf（参照 2012-10-23）.
- (3) “平成23年度除染技術実証事業（環境省受託事業）報告書”. 独立行政法人 日本原子力研究開発機構.
http://www.jaea.go.jp/fukushima/techdemo/h23/h23_techdemo_report.html（参照 2012-10-23）.



神坐 圭介

原子力発電プラント機器の設計およびエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電事業部原子力技術部主席。



富塚 千昭

原子力発電プラント機器の設計およびエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電事業部原子力技術部課長。

北米市場向け UL 規格適合電気自動車用急速充電器^{〈注1〉}

北米の安全規格 UL に適合し、CHAdeMO 仕様^{〈注1〉}に準拠した電気自動車用急速充電器を開発しました。初期設置と運転費用の両面を考慮し、出力容量を 25kW にしています。充電用主回路には、高周波駆動・低ノイズの小型直流充電ユニットを用い、筐体は設置場所を考慮したスリムなデザインです。富士電機の保有する熱設計のノウハウを活用し、内部温度を最適化することにより、高い信頼性を実現しています。さらに、ユーザが充電インフラを構築する上で必須のネットワーク機能として、米国でシェアの高い ChargePoint 社の電気自動車用充電器ネットワークへのインタフェースを搭載しています。これにより、スマートフォンなどを介した充電予約や終了通知などのサービスを受けることができ、利便性が大幅に向上しています。

特長

- (1) CHAdeMO 仕様準拠 25kW 急速充電器 (AC208 V3 相入力)
- (2) UL 認証取得 (2201 および 2231)
- (3) ChargePoint ネットワーク用インタフェース搭載^{〈注2〉}
- (4) 高周波駆動・低ノイズの充電ユニット



北米市場向けUL規格適合電気自動車用急速充電器

〈注1〉 CHAdeMO：チャデモ協会の商標または登録商標

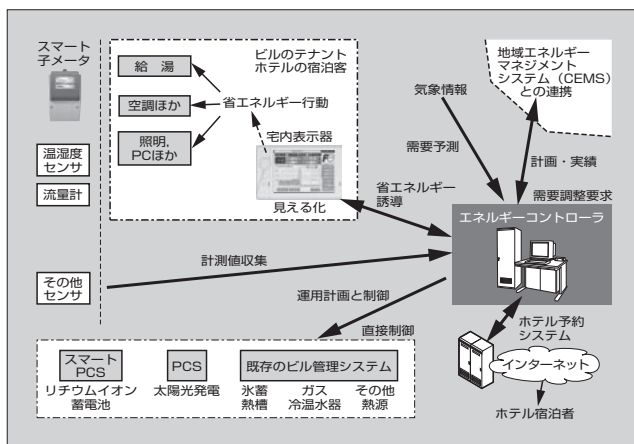
〈注2〉 ChargePoint：米国 ChargePoint 社の商標または登録商標

けいはんなプラザにおける BEMS 本格稼働

経済産業省の補助事業である“けいはんなエコシティ「次世代エネルギー・社会システム」実証プロジェクト”の一環として、けいはんなプラザビルへの BEMS^{〈注1〉}構築を進めてきました。2010 年度から基本設計、製作を行い、2013 年 2 月から本格的な施設全体のエネルギーマネジメントの実証を開始しました。本システムは EMS 基本機能^{〈注2〉}として、見える化、ホテル宿泊客とテナントに対するデマンドレスポンス（省エネルギー誘導）、熱と電気のエネルギー供給設備全体の最適運用などを具備したもので、今後 BEMS のプラットフォームとなるものです。

特長

- (1) 蓄電池、蓄熱槽を含む電気・熱エネルギー供給設備の運用を、需要予測や太陽光発電予測などを基に最適化
- (2) 次世代リチウムイオン蓄電池を用いたスマート PCS による負荷平準化
- (3) ビルのテナント（オフィス、実験施設、レストランなどの店舗）およびホテルの宿泊客に対するインセンティブプログラムによるデマンドレスポンス
- (4) CEMS^{〈注3〉}との連携による地域エネルギーの最適化



BEMS全体構成

〈注1〉 BEMS (Building and Energy Management System)：ビルエネルギーマネジメントシステム

〈注2〉 EMS (Energy Management System)：エネルギーマネジメントシステム

〈注3〉 CEMS (Cluster Energy Management System)：地域エネルギーマネジメントシステム

株式会社セブン-イレブン・ジャパン向け挽きたてペーパードリップ式コーヒーマシン

コンビニエンスストア業界最大手の株式会社セブン-イレブン・ジャパンが新たに展開する“SEVEN CAFÉ”向けに、ペーパードリップ式コーヒーマシンを共同で開発しました。本製品は、お客様がお求めになる都度、挽（ひ）きたて淹（い）れたてのコーヒーを提供します。しかも、ペーパーフィルター交換など日々のメンテナンスが簡単に行えることをコンセプトにしています。

特長

(1) ドリップ式抽出

1杯ごとに豆のミル挽きを行い、ペーパーフィルターを使って抽出することにより、日本人の味覚にあったすっきりとしたコクのあるコーヒーを提供します。

(2) 製品幅 300 mm のコンパクト設計

カウンターに設置しやすいように省スペース化を実現するとともに、販売動作時にはカバーの開閉をロックする機構を設けるなど安全性にも配慮しています。

(3) 液晶表示装置（LCD）付きステンレス外装デザイン

清潔感のあるデザインに、操作ガイドを表示する LCD を配置し、シンプルな操作系を実現しました。



株式会社セブン-イレブン・ジャパン向け
挽きたてペーパードリップ式コーヒーマシン



略語（本号で使った主な略語）

AFC	Automatic Frequency Control	自動周波数制御
AT-NPC	Advanced T-type Neutral-Point-Clamped	アドバンスド T タイプ NPC
A-USC	Advanced Ultra Super Critical	先進超々臨界圧火力発電
BEMS	Building and Energy Management System	ビルエネルギーマネジメントシステム
BOP	Balance of Plant	プラント付帯設備
CCPP	Combined Cycle Power Plant	コンバインドサイクル発電
CEMS	Cluster Energy Management System	地域エネルギーマネジメントシステム
CF	Corrosion Fatigue	腐食疲労
CFD	Computational Fluid Dynamics	数値流体力学
DSS	Daily Start & Stop	毎日起動停止
EDC	Economic Load Dispatching Control	経済負荷配分制御
EMS	Energy Management System	エネルギーマネジメントシステム
EPC	Engineering Procurement and Construction	一括請負工事
FRT	Fault Ride Through	
GF	Governor Free	ガバナフリー
HHV	Higher Heating Value	高位発熱量
HVOF	High Velocity Oxy-Fuel	高速フレーム
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ
IGCC	Integrated coal Gasification Combined Cycle	石炭ガス化複合発電
LCD	Liquid Crystal Display	液晶表示装置
LHV	Lower Heating Value	低位発熱量
LNG	Liquefied Natural Gas	液化天然ガス
PCS	Power Conditioner	パワーコンディショナ
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator	永久磁石同期発電機
PWM	Pulse Width Modulation	パルス幅変調
RB-IGBT	Reverse Blocking IGBT	逆阻止 IGBT
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	
SCC	Stress Corrosion Cracking	応力腐食割れ
SFC	Static Frequency Converter	静止形周波数変換装置
SPM	Surface Permanent Magnet	
SVC	Static Var Compensator	静止形無効電力補償装置
USC	Ultra Super Critical	超々臨界圧火力発電

商標（本号に記載した主な商標または登録商標）

CHAdEMO	チャデモ協議会の商標または登録商標
ChargePoint	米国 ChargePoint 社の商標または登録商標
CitectSCADA	フランス Schneider Automation, Inc. の商標または登録商標
Ethernet	富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標
FOMA	株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモの商標または登録商標
MODBUS	フランス Schneider Automation, Inc. の商標または登録商標

その他の会社名、製品名は、それぞれの会社の商標または登録商標である。

Innovating Energy Technology

エネルギー技術で 奏でるハーモニー。



クリーンエネルギーを生む「創エネ」、
消費の無駄を抑える「省エネ」、
その両輪を活かす「エネルギーマネジメント」。
富士電機は、電気を自在に操る独自のテクノロジーで、
持続可能な社会に貢献していきます。

FE 富士電機

富士電機技報のリニューアルについて

「富士電機技報」は、会社創立の翌年の1924年から89年間にわたり、富士電機の製品や技術を紹介して参りました。このたび、今まで以上に分かりやすく、かつタイムリーに紹介できるようリニューアルすることにいたしましたので、お知らせいたします。

新たに“新製品紹介論文”を企画し、当社の新製品とその技術を紹介いたします。この論文を富士電機技報のホームページに随時掲載することで、皆さまにタイムリーな紹介ができるように努めます。

また、この富士電機技報の冊子は季刊誌といたします。冊子では、従来と同様に特定の製品や技術分野を扱った技術論文を特集するとともに、ホームページに掲載した新製品紹介論文も併せて掲載いたします。

これからも、当社の製品や技術を分かりやすく紹介して参ります。ご理解を賜り、引き続き「富士電機技報」をご愛読いただければ幸いです。

2013年3月

富士電機株式会社 技術開発本部

次号予定

富士電機技報 第86巻 第3号

特集 エネルギーマネジメントシステム

富士電機技報企画委員会

企画委員長	江口 直也				
企画委員幹事	瀬谷 彰利				
企画委員	森岡 崇行	石田 康弘	渡辺 哲仁	小峯 繁	
	富永 保隆	戸澤 克弘	前田政一郎	澤田 睦美	
	植野 利男	保川 幸雄	萩野 慎次	繁田 雅信	
	吉田 隆	上住 洋之			
特集委員	戸澤 克弘	加藤 俊和	片桐 源一	植木 芳照	
事務局	柳下 修	木村 基	小野 直樹	山本 亮太	

富士電機技報 第86巻 第2号

平成25年3月20日印刷 平成25年3月30日発行

編集兼発行人 江口 直也

発行所 富士電機株式会社 技術開発本部
〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目11番2号
(ゲートシティ大崎イーストタワー)

編集・印刷 富士オフィス&ライフサービス株式会社内
「富士電機技報」編集室
〒191-8502 東京都日野市富士町1番地
電話 (042) 585-6965
FAX (042) 585-6539

発売元 株式会社 オーム社
〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地
電話 (03) 3233-0641
振替口座 東京 6-20018

定価 735円(本体700円・送料別)

*本誌に掲載されている論文を含め、創刊からのアーカイブスは下記URLで利用できます。

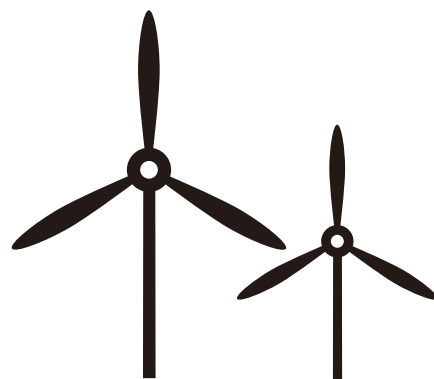
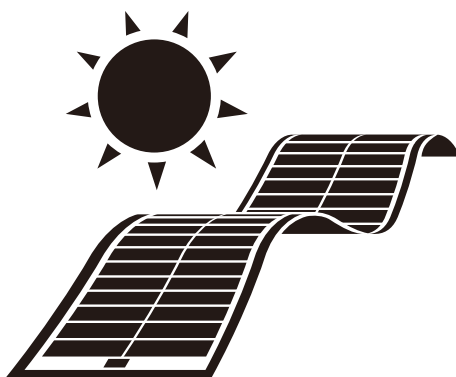
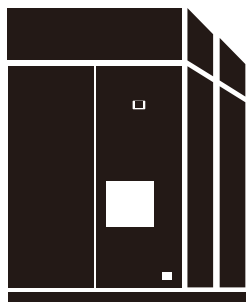
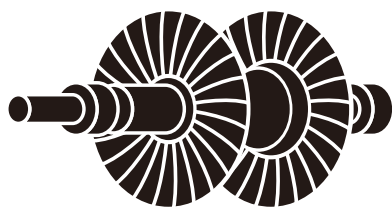
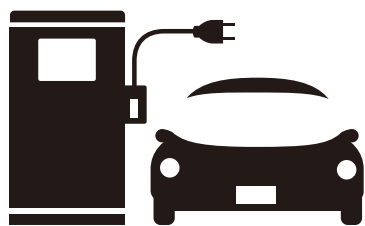
富士電機技報(和文) http://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html

FUJI ELECTRIC REVIEW(英文) <http://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html>

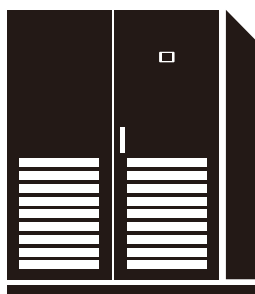
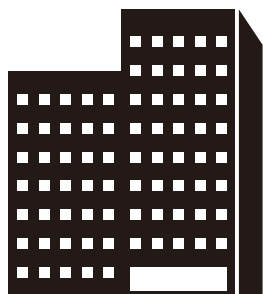
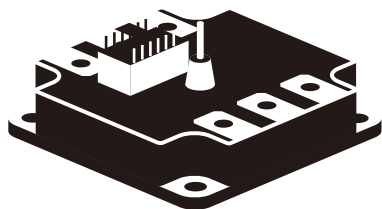
*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。

© 2013 Fuji Electric Co., Ltd. Printed in Japan (禁無断転載)

Innovating Energy Technology



エネルギー技術で、
社会の明日に応えます。



クリーンエネルギーを生む「創エネ」、消費の無駄を抑える「省エネ」、
その両輪を活かす「エネルギーマネジメント」。

富士電機は、電気を自在に操る独自のテクノロジーで、
持続可能な社会に貢献していきます。

FE 富士電機

Innovating Energy Technology



エネルギー技術を、究める。

電気、熱エネルギー技術の革新を通じて、
エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、
安全で安心して暮らすことのできる
持続可能な社会の実現に貢献していきます。

FE 富士電機